



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



석사학위논문

**제주 주변 해역의 여름철
저염분수로 인한 음파전달 변화**

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

김 주 호

2012년 2월



제주 주변 해역의 여름철 저염분수로 인한 음파전달 변화

지도교수 팽동국

김 주 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012년 2월

김주호의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장_____인

위 원_____인

위 원_____인

제주대학교 대학원

2011년 2월



**Acoustic Propagation in Low-salinity
Water near Jeju Island during Summer**

Juho Kim

(Supervised by Professor Dong-Guk Paeng)

A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for degree of Master of Engineering

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2012. 2

요약문

저염분수는 매우 거대한 강 하구나 강우량이 많은 해역에 한정적으로 발생하는 특별한 현상으로써 물리해양학 분야에서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 그에 대한 수중음향학 분야의 연구는 아직까지 미진한 실정이며, 특별히 제주 서부해역에서 주로 발생하는 저염분수가 음파전달변화에 미치는 영향은 아직까지 연구된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 여름철 제주 서부해역에서 저염분수의 발생이 음파전달에 미치는 영향을 고찰하였다. 한국해양자료연구센터 (KODC: Korea Oceanographic Data Center)에서 제공하는 제주 서부해역의 세 정점(313-07, 313-08, 314-10)에서 30 년간(1980~2009)의 8 월 달 자료를 이용해 저염분수 환경의 평균 음속수직분포를 구한 결과 저염분수가 발생하지 않았던 환경에 비해 표층음속이 약 5.56m/s 감소하였으며 그로 인해 음속수직분포가 수심 약 5.1m 까지 양의 기울기를 갖게 되었다. 또한 음선모델(Bellhop)을 이용해 음파전달 모의실험을 실시한 결과 음원이 표층에 존재할 때 표층음파채널(Surface Sound Channel)이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 저염분수 환경에서의 표층채널 형성조건을 찾기 위해서 수온-염분 기울기 도표를 도입하였으며, 도표를 이용한 자료분석 결과 저염분수와 음파채널형성이 직접적인 관계를 갖지는 않으며 수온 수직분포 기울기와 염분 수직분포 기울기 사이의 관계에 의해 결정된다는 것을 확인하였다. 채널에서 음원의 주파수에 따른 음파전달변화를 연구한 결과 평균적인 저염분수 환경에서의 차단 저주파수는 8.23kHz 였으며, 조사자료 중 표층염분이 가장 낮게 나타났던 1996 년 8 월의 경우는 2.54kHz 로 나타났다. 또한 국립해양조사원에 의해 2010 년 8 월 제주 서부해역에서 수집된 자료를 이용해 염분의 공간변화에 의한 음파전달 변화를 거리중속모델(RAM)을 통해 모의하였다. 그리고 제주 남부해역의 두 정점에서 2009 년 7 월 27 일에서 28 일 사이의 26 시간 동안 1 시간 간격으로 측정된 수심 별 수온과 염분 자료를 바탕으로 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화와 저염분수로 인한 변화를 비교하였다. 그 결과 음원이 수온약층 부근에 존재 할 경우의 음파전달은 수온의 일변화에 더 큰 영향을 받으며 음원이 표층에 존재하는 경우는 저염분수의 유무에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 이러한 결과들은 차후 저염분수 환경에서의 음파전달 측정과 소나 운용 및 수중통신 응용 연구를 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

ABSTRACT

The low salinity water produced by continental river discharge or the heavy precipitation has been investigated so far in oceanographic research area as a specific phenomenon. However, the acoustic research in low-salinity water near the Jeju Island has not been studied yet. Therefore the influence of low salinity water on the acoustic propagation is investigated in this thesis. The average sound speed of low salinity environment in the surface was decreased 5.56m/s from the averaged sound speed of normal salinity environment and its positive gradient was down to 5.1m depth, from the analysis of the data measured by KODC (Korea Oceanographic Data Center) on three sites (313-07, 313-08, 314-10) of western Sea of Jeju Island in August for 30 years (1980~2009). The acoustic propagation was simulated by a Ray Model (Bellhop algorithm) and the surface sound channel (SSC) was formed in the averaged low salinity environment. In order to find the condition for SSC in the low salinity water, the Temperature-Salinity (T-S) gradient diagram was introduced. There was no direct link between the SSC and the low salinity water itself, but the SSC could be formed by the relation with the gradient of temperature and salinity profile, which was easily shown in the T-S gradient diagram. The low frequency cut-off was calculated to 8.23kHz for the averaged low salinity environment and 2.54kHz for the case of August in 1996 whose salinity on surface was lowest in 30 years, from the study of source frequency on acoustic propagation in SSC. The acoustic propagation by spatial distribution of low salinity water was calculated using RAM (Range dependent Acoustic Model) with the temperature and salinity data of western sea of Jeju Island measured in August of 2010 by NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). The variation of sound propagation by the diurnal variation of temperature and the low salinity water were compared using in-situ data acquired at the two sites in the southern sea of Jeju Island every hour for 26 hours from Jul. 27th in 2011. The acoustic propagation was more affected by the temperature diurnal variation than the low salinity water when the source was located near thermo-cline, but more affected by the low salinity water than the temperature diurnal variation when the source was located near the surface. These results may be used to further studies of the effects of the low-salinity water on the acoustic propagation and its applications such as sonar performance and underwater communications.

목 차

요약문	i
ABSTRACT	ii
LIST OF FIGURES	v
제 1 장 서 론.....	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	2
2.1.1 저염분수 특성 연구.....	2
2.1.2 저염분수 환경의 음파전달 연구.....	3
1.3 연구내용	4
1.4 논문순서	5
제 2 장 저염분수와 관측자료수집	6
2.1 저염분수	6
2.2 관측자료수집	9
제 3 장 저염분수 환경에서의 음파전달 변화.....	12
3.1 저염분수로 인한 음속의 변화	12
3.1.1 염분이 음속에 미치는 영향	12
3.1.2 저염분수가 음속수직분포에 미치는 영향	14
3.2 저염분수로 인한 음파전달 변화	21
3.2.1 음파전달 모델과 모의실험 환경.....	21
3.2.2 저염분수로 인한 음파전달 경로 변화	22
제 4 장 저염분수 환경에서의 표층채널 형성조건.....	27
4.1 자료 분석	27
4.2 표층채널 형성 조건	32

4.3 수온-염분 기울기 도표를 이용한 실측데이터 분석	35
제 5 장 표층채널로 인한 음파전달 변화	48
5.1 음원의 주파수에 따른 음파전달 변화	48
5.2 염분의 공간변화에 따른 음파전달 변화	60
5.2.1 자료수집 및 음속수직분포	60
5.2.2 거리 종속환경에서의 음파전달 변화	60
5.3 저염분수 환경에서 음파전달의 일변화	67
3.2.1 제주 남부 해역에서 음속의 일변화	68
3.2.2 제주 남부 해역에서 음파전달의 일변화	70
제 6 장 결론 및 향후	83
참고문헌	86

LIST OF FIGURES

- Fig. 2.1. Horizontal distribution of salinity (psu) at the surface in Aug. 1981[13]. The low salinity water flowing toward the Jeju island is shown.8
- Fig. 2.2. A horizontal map of salinity at 10m depth in Aug. 2003 using data from the KODC (Korea Oceanographic Data Center)[16]. The low salinity eddy is located in the southwest sea of Jeju Island.....8
- Fig. 2.3. Data acquisition sites for analysis and sound propagation modeling. Three sites from KODC (Korea Oceanographic Data Center) online service are marked with triangles(A: 313-08, B: 313-07, C: 314-10) and 20 sites from NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute) are marked with circles..... 10
- Fig. 2.4. Location of data acquisition sites (by NFRDI in Aug 1, 2010). 20 sites in western sea of the Jeju-Island were selected. The gray contour means salinity distribution on the surface in the area. 10
- Fig. 2.5. Data acquisition sites. Two sites in south coast of Jeju Island are marked by X. 1
- Fig. 3.1. Sound speed in the ocean at 10m depth where temperature and salinity are changed from 10 to 20 (°C) and from 25 to 35 (psu) respectively 1
- Fig. 3.2. Salinity in August for 30 years (from 1980 to 2009) at three sites provided by KODC online service(top: site A, middle: site B, bottom: site C in Fig.2.3). Very low salinity water was detected in 1989, 1996, 2003, 2004 and 2006(marked with star)..... 1
- Fig. 3.3. (a) and (b): Temperature and salinity profiles respectively for 30 years at 314-10 provided by KODC online service, (c): Temperature profile (solid line: mean data for 30 years, dashed line: standard deviation), (d) Salinity profiles (solid line: mean salinity data for low salinity environment (1989, 1996, 2003, 2004, 2006), dashed: mean salinity data for normal salinity of other years, dotted line and dash-dot line: standard deviation) 16
- Fig. 3.4. SSPs (Sound Speed Profiles) (solid line: SSP of averaged low salinity environment, dash-dot and dashed line: SSP standard deviation of averaged normal salinity environment)..... 18
- Fig. 3.5. SSPs(Sound Speed Profiles) from surface to 20m depth (solid line: SSP of averaged low

salinity environment, dash-dot line: SSP of averaged normal salinity environment)	18
Fig. 3.6. Temperature profiles (solid line: temperature on Aug. 5 th , 1996, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of temperature profile with normal salinity data, respectively).....	19
Fig. 3.7. Salinity profiles (solid line: salinity profile on Aug. 5 th , 1996, dash-dot line: mean salinity profile of low salinity environment, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of salinity profile with normal salinity data, respectively).....	19
Fig. 3.8. SSPs(Sound Speed Profiles) (solid line: SSP on Aug. 5 th , 1996, dash-dot line: mean SSP of normal salinity environment, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of SSP with normal salinity data, respectively).....	20
Fig. 3.9. Diagram of underwater environment for acoustic propagation model. Range independent environment is considered. Depth and range are 80m and 2km respectively. A source is located at 3m, 20m, and 40m depth.....	1
Fig. 3.10. Acoustic propagation results for source depth 3m. (a) and (b) are ray tracing and transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5 th in 1996.....	24
Fig. 3.11. Acoustic propagation results for source depth 20m. (a) and (b) are ray tracing and Transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5 th in 1996.....	25
Fig. 3.12. Acoustic propagation results for source depth 40m. (a) and (b) are ray tracing and Transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5 th in 1996.....	26
Fig. 4.1. Schematic diagram for ray spreading in SSC (Surface Sound Channel) (right) with SSP(Sound Speed Profile) (left). c_0 is minimum sound speed within channel which is	

called as channel axis, and h is the depth of channel border and c_h is the sound speed at h . The sound rays leaving a source are trapped in SSC within angle χ 1

Fig. 4.2. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), and critical angle of ray (bottom) for 30 years at site B(313-07) 30

Fig. 4.3. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom) for 30 years at site B(314-10) 31

Fig. 4.4. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom) for 30 years at site C(314-10) 31

Fig. 4.5. Temperature-Salinity (T-S) gradient diagram with varying temperature (15°C to 30°C) where the gradient of sound speed profile is zero..... 34

Fig. 4.6 Gradient of temperature and salinity with varying temperature(15°C to 30°C) in 2 dimension where the gradient of sound speed profile is zero. The slope becomes steeper as temperature increases(15°C to 30°C)..... 34

Fig. 4.8. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 15, 1993 at three sites indicated in Fig.2.3 (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C) 36

Fig. 4.7. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 15, 1993. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)..... 1

Fig. 4.9. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 12, 2003. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)..... 38

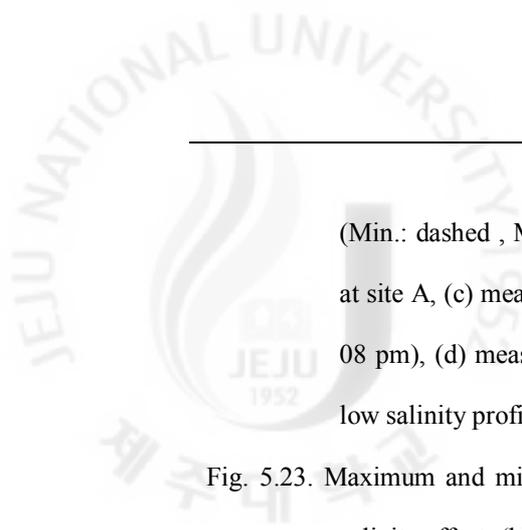
Fig. 4.10. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 12, 2003 at three sites indicated in Fig.2.3. (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C) 38

Fig. 4.11. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 12, 2003. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)..... 40

Fig. 4.12. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 12, 2003 at three sites indicated in Fig.2.3. (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C)	40
Fig. 4.13. Ray tracing result for site A on Aug. 12, 2003. (Channel depth:10m, critical angle of ray: 4.47°)	41
Fig. 4.14. Ray tracing result for site B on Aug. 12, 2003. (Channel depth:5m, critical angle of ray: 2.94°)	41
Fig. 4.15. Ray tracing for site C on Aug. 12, 2003 (No surface channel).....	41
Fig. 4.16. Data analysis results for JNU data of 20 sites. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom)	43
Fig. 4.17. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 1, 2009 at B4. Profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right).....	44
Fig. 4.18. T-S gradient diagram from profiles of Fig.2.4 measured on Aug. 1, 2010 at B4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradients of temperature and salinity value with depth from surface to 10 m for every 1 m).....	44
Fig. 4.19. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 1, 2009 at C4. Profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right).....	45
Fig. 4.20. T-S gradient diagram result from profiles of Fig.2.4 measured on Aug. 1, 2010 at C4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradients of temperature and salinity with depth from surface to 10 m every 1 m).....	45
Fig. 4.21. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug.1.2009 at D4. Only profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right).....	46

Fig. 4.22. T-S gradient diagram result from profiles of Fig.2.4 measured on Aug.1.2010 at D4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradienst of temperature and salinity with depth from surface to 10 m every 1 m)	46
Fig. 4.23. Ray tracing for site B4 on Aug. 1, 2010. (No surface channel)	47
Fig. 4.24. Ray tracing for site C4 on Aug. 1, 2010. (Channel depth:8m, critical angle of ray: 2.04°)	47
Fig. 4.25. Ray tracing for site C4 on Aug. 1, 2010. (Channel depth:6m, critical angle of ray: 3.41°)	47
Fig. 5.1. Transmission loss with depth and range for source frequency 1.5kHz (top), 3.0kHz (middle), 4.5kHz (bottom) in mean low salinity environment	1
Fig. 5.2. Transmission loss with depth and range for source frequency 1.5kHz (top), 3.0kHz (middle), 4.5kHz (bottom) on Aug. 5 th , 1996	1
Fig. 5.3. Transmission loss with range at 3m depth in mean low salinity environment (top): 1.5kHz, (middle): 3.0kHz, (bottom): 4.5kHz	1
Fig. 5.4. Comparison of transmission loss with 1.5kHz and 4.5kHz of source frequency	1
Fig. 5.5. Transmission loss with range at 3m depth on Aug. 5 th , 1996 (top): 1.5kHz, (middle): 3.0kHz, (bottom): 4.5kHz, with geometric spreading loss(dashed lines)	1
Fig. 5.6. Transmission loss with depth at range of 6 km from a source for mean low salinity environment. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz	1
Fig. 5.7. Transmission loss with depth at range of 8 km from a source for mean low salinity environment. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz	1
Fig. 5.8. Transmission loss with depth at range of 6 km from a source for case of 1996. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz	1
Fig. 5.9. Transmission loss with depth at range of 8 km from a source for case of 1996. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz	1
Fig. 5.10. Transmission loss versus frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle), 12km (star) and 18km(circle) from a source for mean low salinity environment	58
Fig. 5.11. Transmission loss versus frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle),	

12km (star) and 18km(circle) from a source for case of 1996.	58
Fig. 5.12. Revised transmission loss in terms of attenuation coefficient versus source frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle), 12km (star) and 18km(circle) from a source.	1
Fig. 5.13. Diagram of ocean sea-bed and SSPs (sound speed profiles) for D4(left), middle(C4) and B4(right).	1
Fig. 5.14. Transmission loss for range dependent environment. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4. The sound energy is propagated through the surface channel.	63
Fig. 5.15. TL(Transmission Loss) with range at 5m depth. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4. There is a drastic increase of TL at 19km where the surface sound channel is disappeared due to change of sound speed profile.	64
Fig. 5.16. TL(Transmission Loss) with depth at (a) 8km, (b) 16km and (c) 24km. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4.	64
Fig. 5.17. TL (Transmission Loss) for range dependent environment. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.	65
Fig. 5.18. TL(Transmission Loss) with range at 5m depth. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.	66
Fig. 5.19. TL(Transmission Loss) with depth at (a) 8km, (b) 16km and (c) 24km. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.	66
Fig. 5.20. Diurnal variation of temperature and salinity profiles with average and standard deviation values (errorbars). (a) site A(AM10 Jul 27 th to AM11 28 th 2009), (b) site B(PM01 Jul 27 th to PM02 28 th 2009), respectively	69
Fig. 5.21. Diurnal variation of SSP with average and standard deviation values(error bars). (a) site A(AM10 Jul 27 th to AM11 28 th 2009), (b) site B(PM01 Jul 27 th to PM02 28 th 2009).	69
Fig. 5.22. Maximum and minimum profiles of two sites. (a) measured temperature profiles at site A(Min.: triangle, 11 am with Max.: star, 10 pm) (b) measured normal salinity profiles	



(Min.: dashed , Max.: solid) and assumed low salinity profiles(Min.: star, Max.: triangle) at site A, (c) measured temperature profiles at site B(Min.: triangle, 03 am with Max.: star, 08 pm), (d) measured normal salinity profiles (Min.: dashed , Max.: solid) and assumed low salinity profiles(Min.: star, Max.: triangle). 71

Fig. 5.23. Maximum and minimum SSPs at two sites. (a) Max. and Min. SSPs at site A with low salinity effect, (b) Max. and Min. SSPs at site B with low salinity effect..... 71

Fig. 5.24. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site A(2009.7.27-28) where source depth is 5m. Minimum (a) and maximum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Min. (c) and Max. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment 72

Fig. 5.25. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site A(2009.7.27-28) where source depth is 20m. Minimum (a) and maximum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Min. (c) and Max. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment 72

Fig. 5.26. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site B(2009.7.27-28) where source depth is 5m. Maximum (a) and minimum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Max. (c) and Min. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment 73

Fig. 5.27. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site B(2009.7.27-28) where source depth is 20m. Maximum (a) and minimum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Max. (c) and Min. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment 73

Fig. 5.28. TL difference for diurnal variation of ocean in normal salinity environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.24(a) and Fig.5.24(b) where source depth is 5m . 75

Fig. 5.29 TL difference for salinity variation of ocean environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.24(a) and Fig.5.24(c) where source depth is 5m 75

Fig. 5.30. Mean variation of TL with depth by taking the average of TL difference over ranges from 0

to 5 km; diurnal variation (dashed line) and salinity variation (solid line) where source depth is 5m.	76
Fig. 5.31. TL difference for diurnal variation of ocean in normal salinity environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.25(a) and Fig.5.25(b) where source depth is 20m	77
Fig. 5.32. TL difference for salinity variation of ocean environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.25(a) and Fig.5.25(c) where source depth is 20m	77
Fig. 5.33. Mean variation of TL with depth result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation (dashed line) and salinity variation (solid line) where source depth is 20m.	78
Fig. 5.34. Mean variation of TL with depth in Site A result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 5m.	80
Fig. 5.35. Mean variation of TL with depth in Site A result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 20m.	80
Fig. 5.36. Mean variation of TL with depth in Site B result from taking the average of TL difference with range for each depth; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 5m. .	82
Fig. 5.37. Mean variation of TL with depth in Site B result from taking the average of TL difference with range for each depth; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 20m.	82



서

론

1.1 연구배경

음파의 전달 측면에서 해양은 매우 복잡한 환경이다. 위로는 해수면이 아래로는 해저면이 경계면으로 존재하며 매질의 특성이 시간과 공간에 따라 변한다. 바람의 영향으로 파도 치는 해수면은 음파의 전달방향과 위상에 영향을 주고[1,2] 배경소음을 증가시키며 때로는 기포가 발생하여 음파전달을 방해하기도 한다[3-6]. 또한, 해저면은 구성물질에 따라 반사계수가 달라지며 표면이 거친 해저면은 음파를 산란시키기도 한다[7,8]. 음파 전달 변화에 있어서 경계면의 영향도 중요하지만 해수의 물리적인 특성 또한 큰 영향을 미친다. 해수의 물리적인 특성은 주로 음파의 굴절과 관계가 있는데 이로 인해 동일한 경계조건 안에서도 해수특성에 따라 전달 경로가 달라질 수 있다[8,9]. 특히, 음파신호를 다루는 수중음파통신 및 탐지분야에서는 음파의 전달 경로변화에 따라 신호의 특성이 달라지므로 해양환경에 따른 음파 전달경로변화의 이해는 매우 중요하다고 할 수 있다[9]. 여기서 음파전달경로에 직접적인 영향을 주는 물리적인 특성은 주로 수심에 따른 음속분포이다.

수중에서 음속을 변화시키는 요인은 몇 가지가 있는데, 일반적으로 잘 알려진 Medwin(1975)의 음속공식에 의하면 그것은 수온, 염분 그리고 수심이다[10]. 그런데 여기서 염분은 다른 요인에 비해 차수가 낮을뿐더러 해양에서의 시공간적 변화는 수온에 비해 대체적으로 적다. 따라서 일반적으로 음속은 수온과 수심에 영향을 받는다고 할 수 있으며, 수심의 영향이 크지 않은 천해환경에서는 주로 수온에 영향을 받게 된다. 하지만 이는 기본으로 시공간에 따라 염분이 크게 변하지 않는다는 가정하에서만 성립된다. 그러나 만약 특정 해역에 적지 않은 염도변화가 발생하여 음속이 영향을 받는다면, 음파전달

측면에서 어떠한 변화가 일어나게 될 것인가? 이러한 질문은 본 연구의 시발점이 되었다. 실제로 표층에서의 염도변화가 크게 변화하는 해역이 존재하며, 그에 대한 많은 연구가 진행되고 있기 때문이다. 다음 장에서 구체적으로 언급하겠으나, 그 동안의 물리해양학적 연구에 의하면 중국의 양쯔강 하구로 배출되는 많은 양의 담수가 여름철이면 동중국해역을 비롯한 제주 서부해역의 표층염분을 크게 낮춘다고 한다. 따라서, 본 논문은 여름철 제주 서부 해역에서 염분변화로 인한 음파전달 변화를 연구 하였다.

1.2 연구동향

2.1.1 저염분수 특성 연구

물리해양학에서 해양의 물리적인 특성을 연구할 때 해수의 염분에 대한 조사는 기초적이라고 할 수 있다. 쿠로시오 해류(Kuroshio current)가 지나는 길목인 동중국해와 제주 근해 및 대한해협은 오래 전부터 물리해양학적으로 다방면에 걸친 연구가 꾸준히 진행되어오고 있는데 특별히 동중국해와 제주근해에 걸쳐 발생하는 저염분 현상은 1970년대부터 연구가 되어오고 있으며 1980~1990 년대에 걸쳐 제주 인근해역에서 나타나는 저염분수의 기원 및 특성들을 밝히는 연구들이 집중적으로 진행되어 많은 결과들을 도출하였다. 저염분수의 이동경로와 이동시간 등 아직 구체적으로 밝혀지지 않은 사실들도 있으나 현재까지 이를 제외한 많은 사실들이 밝혀졌다[18]. 최근에는 이어도 종합해양과학 기지로부터의 자료 및 위성을 이용한 자료들을 이용하여 해양-기상정보 체계를 이용한 연구들이 진행되고 있으며[16,19-20], 태풍의 영향이 고려된 동중국해의 3 차원 해수순환모델을 통해 저염분수의 이동경로를 예측하는 연구가 진행되고 있다[21].

2.1.2 저염분수 환경의 음파전달 연구

저염분수에 대한 연구가 물리해양학 분야에서 꾸준히 진행이 되어온 반면 저염분수가 존재하는 환경에서의 음향학적인 연구는 수행되어온 바가 거의 없다. 이는 저염분수가 일반적인 해양에서 흔히 관찰할 수 있는 현상이 아니기 때문으로 생각 된다. 그러나 몇몇 연구자에 의해 저염분수 환경에서의 음파전달변화에 관한 연구가 수행된 바가 있는데 이를 요약하면 다음과 같다.

먼저 E. Dosso and N. R. Chapman(1983)은 캐나다 서쪽 동북태평양의 특정 해역에서 독특한 수직음속분포 환경에서의 음파전달 변화에 대한 연구를 수행하였다[23]. 해당 해역에서는 유독 많은 강우가 내리는데 이때, 일반적으로 형성되는 심해음파채널(deep sound channel)의 최소음속층 수심 보다 얕은 100m 부근에 수심에 따라 염도가 크게 변하는 지점이 있으며 이로 인해 천해음파채널(shallow sound channel)을 형성하는 독특한 수직음속분포가 발생한다는 것을 발견 하였다. 그리고 그러한 환경하에서의 음파전달변화를 전달손실의 관점에서 연구하였다. 거리종속적인 음파전달 시뮬레이션과 실험을 통하여서 음원이 천해음파채널 안에 위치할 경우 음파가 굴절현상으로 인해 채널에 갇혀 전파 될 수 있으며 이에 따른 전달손실은 주파수 변화에 따라 다르다는 것을 밝혀 내었다. 이는 저염분수 환경에서의 음파전달 변화를 최초로 다룬 연구라고 파악된다. 그러나 수심에 따른 염분분포를 밝히지 않는 등 염분과 음파전달간의 관계에 대해서는 구체적으로 다루지 않았다.

N. P. Bulgakov et al.(1992)은 대륙의 큰 강으로부터 많은 양의 담수가 유출되며 강우량도 현저하게 많은 열대 대서양에서 염분이 변화함에 따라 음파전달이 어떠한 영향을 받을 수 있는지 음선의 관점에서 연구 하였다[24]. 그 결과 표층에서 염분에 의한 표층채널(Haline Channel)이 형성된다는 사실을 밝혔다. 또한 염분변화에 대한 음속수직분포 변화를 나타내기 위해 음선 임계각을 적용하여 해역에 따라 저염분수로 인한 임계각 변화를 산출하여 보고하였다. 그들은 저염분수 환경에서 실측자료를 이용한 음파전달 변화를 다루었으나 음선 임계각을 통해 표층에 나타나는 저염분수의 영향을 간접적으로 밝혔을 뿐, 염분분포 변화와 음파전달 변화를 구체적으로 관련 짓지 못한 한계가 있다.

1.3 연구내용

이전 절에서 언급 하였듯이 저염분수의 특성에 대해 물리해양학에서는 많은 연구가 진행되어 왔으나 음향학적인 연구는 현재까지 미진한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 저염분수의 발생으로 인한 물리적인 환경변화가 음파전달에 어떠한 영향을 얼마나 미치는지에 대한 기초적인 내용을 다룬다. 특별히 본 논문에서는 양쯔강의 하구에서부터 생성된 저염분 수괴가 해류를 타고 이동해오는 제주 서부해역에서의 현상들을 다룬다.

먼저 저염분수가 존재하는 환경의 평균 음속수직분포를 구하고자 한국해양자료연구센터(KODC: Korea Oceanographic Data Center)에서 제공하는 자료 중 양쯔강과 가까운 세 정점에서(313-07, 313-08, 314-10) 30 년간(1980~2009)의 8 월 달수온 및 염분자료를 이용하였으며, 공간에 따라 저염분 분포가 변하는 환경에서의 음파전달변화를 연구하기 위해 국립수산물과학원과 제주도청의 지원으로 제주대학교 아라호를 이용하여 취득 하였던 2010 년 8 월 1 일 제주 서부해역 20 개 정점에서의 수온, 염분 자료를 이용하였다.

획득된 자료를 바탕으로 저염분수 환경에서 음속이 어떠한 변화를 겪는지, 그리고 그에 따른 음파전달 변화가 어떠한지 음파전달 모델링을 통해 분석하였다. 음파전달 모델링으로는 Bellop 알고리즘을 이용한 음선모델[26]과 쌍곡선함수방정식을 이용한 RAM(Range dependent Acoustic Model)[27]을 이용하였다. 모의 실험 결과 저염분수 환경에서는 표층 음파 채널(Surface Sound Chennel)이 형성되는 것을 확인하였는데, 표층음파채널과 저염분수와의 관계를 파악하기 위해 표층음파채널의 형성 조건에 대한 연구를 수행하였으며 이를 위해 수온과 염분 그리고 표층채널간의 관계를 나타내는 도표를 도입하였다. 또한 저염분수로 인해 표층음파채널이 형성되었을 경우 발생하게 되는 다양한 음파전달변화를 파악하고자 음원의 주파수에 따른 음파전달변화, 저염분수의 공간적 분포에서의 음파전달 변화 및 수온이 일변화 하는 환경에서의 저염분수로 인한 음파전달 변화 등 다각적인 연구를 수행하였다.

1.4 논문순서

제 2 장에서는 저염분수 발생과정 및 특징 등의 전반적인 이해를 돕기 위해 저염분수의 특성에 대한 물리해양학적인 기본 설명을 실었다. 또한 3 장에서 5 장까지 다루게 될 실험역 자료에 대한 구체적인 설명을 한다.

제 3 장에서는 저염분수 환경에서의 음파전달 변화를 일반화 시키기 위하여 제주 서부해역의 세 정점(313-07, 313-08, 314-10)에서 측정된 지난 30 년간 (1980~2009)의 8 월 달 수온 및 염분 자료를 이용하여 저염분수가 발생한 환경에서의 평균음속 수직분포를 구하고 그에 따른 음파 전달 변화를 관찰한다. 또한, 저염분수가 매우 강하게 발행하였던 1996 년 8 월의 자료를 이용하여 같은 방법의 조사를 수행 함으로써 그 결과를 비교해 본다.

제 4 장에서는 표층채널과 저염분수와의 상관관계를 파악하기 위해 음속공식을 이용하여 표층채널 형성조건을 구한다. 그 결과로 수온-염분 기울기 도표를 제안하였으며, 이를 검증하기 위해 KODC 에서 제공하는 자료 중 2003 년과 2006 년 8 월 세 정점(313-07, 313-08, 314-10)에서의 자료와 2010 년 8 월 제주 서부해역의 20 개 정점에서 제주대학교 아라호를 통해 측정된 자료 중 저염분수의 세력이 강했던 세 정점에서의 자료를 적용하였다.

제 5 장에서는 저염분수로 인해 표층채널이 발생한 환경에서 음파전달이 어떠한 특성을 갖는지 다양한 방법으로 살펴본다. 먼저 표층음파채널에서 음원의 주파수가 달라질 때 음파전달이 어떻게 달라지는지 그리고 저염분수환경에서 염분이 공간적으로 변하는 환경에서의 음파전달은 어떠한 결과를 보이는지에 대해 살펴본다. 마지막으로 수온이 일변화 하는 환경에서의 음파전달 변화와 저염분수로 인한 음파전달 변화를 비교해 본 후 제 6 장에서 결론을 내리고 논문을 맺는다.

저염분수와 관측자료수집

2.1 저염분수

여름철이 되면 제주도 주변해역에서는 표층의 염분이 저하되는 현상이 발생하는데 이는 중국대륙연안수가 동중국해를 거쳐 확장해 오기 때문이다 [11,12]. 여기서의 중국대륙연안수란 중국 대륙으로부터 배출되는 하천수에 의해 만들어지는 수괴를 말하며 특히 양쯔강의 담수 배출량이 수괴형성에 가장 큰 영향을 미친다[13]. 한편 Limeburber et al.(1983)과 Yu et al.(1983)은 양쯔강 하구 및 그 주변에서 각각 30.00psu 및 31.50psu 이하의 저염수를 중국대륙연안수라고 보고한 바 있으며[14,15] Kim 과 Rho(1994)는 제주도 주변해역에 출현하는 중국대륙연안수 중 표층염분이 32.20psu 이하인 경우를 저염수로 정의한 바 있다[13]. 최근 연구에서는 일반적으로 30psu 이하의 염도를 갖는 중국대륙연안수를 저염분수라 통칭 하고 있으며[16] 본 논문에서도 이를 적용하였다.

저염분수의 출현 및 소멸시기는 해마다 다르나, 제주도와 추자도 사이의 해역에서 18 년간의 염분변화를 살펴보면 1 월부터 5 월 중순까지는 표층에 34.00psu 이상의 고염분수가 존재하다가 5 월부터 염분이 낮아지기 시작하여 7 월 초순이 되면 저염분수가 출현해 8 ~ 9 월 동안에는 년 중 최저염분이 지속되며 10 월 중에 저염분수는 소멸하고 이후 12 월 하순까지 계속 염분이 증가한다. 저염분수 발생시의 표층 최저 염분은 28.04 ~ 32.20psu 이하로 변동폭이 크며 출현 시기 및 지속시기 또한 해에 따라서 매우 다르다[13].

저염분수가 출현하면 측정지점에서의 염분이 수일 내로 급격하게 감소되는데 이어도에서 측정된 저염분수 자료를 살펴보면 감소하는 비율과 정도는 경우마다 달라 저염분수의 특성과 이동경로가 큰 시공간적 변화를

보인다는 것을 알 수 있다[16]. 저염분수의 정확한 이동경로와 이동시간에 대해서는 아직까지 보고된 바가 없는데, 이는 양쯔강 저염분수가 관측이 어려운 형태로 이동을 하기 때문인 것으로 알려져 있다[17]. 그러나 Le(1983)는 염분에 대한 다양한 연구를 종합하여 양쯔강 하류부근에 출현하는 저염분수의 월별 진행방향을 나타내었는데 이에 따르면 6 월부터 8 월까지는 대체로 양쯔강 하구로부터 제주를 향한 북동방향의 경로를 택하고 있다. Fig.2.1 은 Yu et al.(1983)이 밝힌 1981 년 8 월 동중국해의 표층염분분포를 나타낸 그림인데 저염분수의 분포가 양쯔강 하구로부터 북동방향인 제주도를 향하는 것을 볼 수 있다. 그러나 때에 따라서 제주 서부해역에 출현하는 저염수와 중국 양쯔강 하구에서의 저염수가 서로 이어지지 않고 분리되어 독립된 와류형태로 분포하는 경우도 있는데(Fig.2.2) 이는 양쯔강의 담수 유출량이 시간에 따라 달라 짐에 따라 제주도 주변해역의 저염수와 양쯔강 하구의 저염수가 분리되어 독립된 형태로 분포하기 때문으로 알려져 있다[18].

국립수산진흥원 해양관측 정점인 203-03 정점에서 1965 부터 1984 년까지 20 년간의 자료를 분석한 결과 제주해협에서 저염분이 출현한 경우 그 두께는 평균 25m 이고 대체로 50m 정도의 깊이까지 영향을 주고 있으며 그로 인해 0~50m 까지 강한 염분약층이 생성된다[13].

제주 서부해역의 여름철 평균 염분이 다른 해역에 비해 낮지만 경우에 따라 평년에 비해 더 낮은 염분의 저염분수가 출현하는 경우가 있는데 이를 이상저염분수라 한다. 1996 년 여름철 제주도 주변해역에서는 22psu, 1998 년에는 26psu 까지 매우 낮은 저염분수가 출현하였는데 이는 평년 저염분인 28-29psu 보다 무려 2-7psu 낮은 이상저염분수이다. 특히 1996 년에는 제주도 서부 전해역이 26psu 이하로 분포하여 어패류가 폐사하는 등 제주도 수산업에 많은 피해를 주었다. 이는 제주도의 강수량과는 관계없이 양쯔강 하구의 담수 유출량 증가가 그 원인인 것으로 드러났다[18].

대계 염분은 수심에 따라 증가하며 해수의 연직 혼합은 표층염분을 증가시킨다. 일반적으로 여름철에 태풍이 있는 시기에는 제주도 주변해역에서 저염분수가 측정되지 않는데 이는 태풍의 영향이 저염화를 억제하는 역할을 하기 때문이다[16,18].

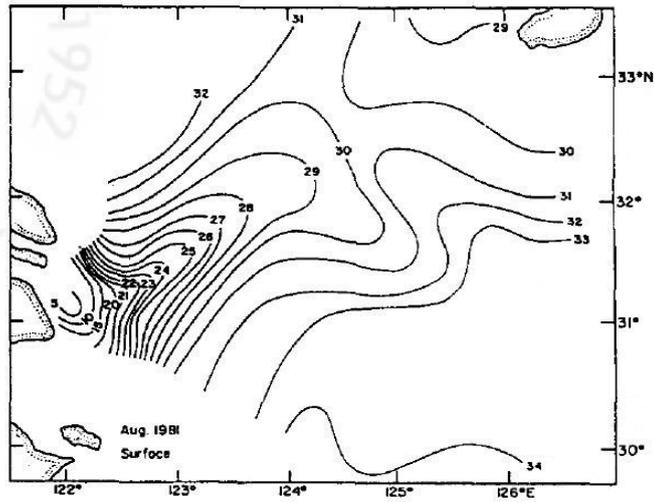


Fig. 2.1. Horizontal distribution of salinity (psu) at the surface in Aug. 1981[13]. The low salinity water flowing toward the Jeju island is shown.

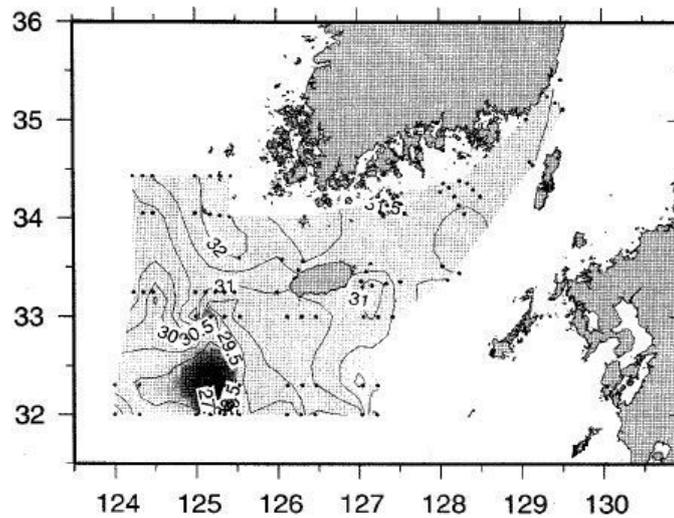


Fig. 2.2. A horizontal map of salinity at 10m depth in Aug. 2003 using data from the KODC (Korea Oceanographic Data Center)[16]. The low salinity eddy is located in the southwest sea of Jeju Island.

2.2 관측자료수집

저염분수가 출현한 환경에서 음속 및 음파 전달이 실질적으로 변화하는 현상을 모의하기 위해 실 해양 자료를 이용하였다. 본 논문에서는 다양한 경우에 대한 모의 실험을 실시 하였는데, 각 모의 실험의 목적에 맞는 자료들을 이용하였다.

먼저, 저염분수가 출현하는 평균적인 환경을 모의하기 위해 국립수산과학원(NFRDI: National Fisheries Research and Development Institute) 산하 한국해양자료센터(KODC: Korea Oceanographic Data Center) 에서 온라인으로 제공하는 자료 중 313-07, 313-08, 314-10 정점에서 1980 년부터 2009 년까지 30 년간의 자료를 이용하였다. 제주 서부해역에 위치한 위의 세 정점은 한국해양자료센터에서 측정하는 정점 중 양쯔강 하구에 가장 가까운 정점으로써 양쯔강 하구로부터의 직선거리는 약 300km 이다(Fig.2.3). 한국해양자료센터(KODC)에서는 각 정점에서 2 월부터 12 월까지 격월로 0m, 10m, 20m, 30m, 50m 그리고 70 m 이상의 측정수심에 따른 수온, 염분 등의 자료를 제공한다. 그러나 실제 해양환경은 이산적이지 않기 때문에 본 논문에서는 측정 수심 별 자료에 1m 간격의 cubic 보간법을 적용하여 이용하였다.

한번 저염분수가 출현하면 해당 해역에서 염분의 공간적 분포가 변하게 되는데 이렇게 염분이 공간적으로 변하는 환경에서의 음파전달 변화를 연구하기 위해 지난 2010 년 8 월 1 일 제주 서부해역에서 관측한 저염분수 자료를 이용하였다. 국립수산과학원(NFRDI)과 제주도청의 도움으로 제주대학교 아라호를 이용하여 제주 서부 해역의 20 개 정점에서 수온 및 염분을 측정하였다. 가장 북쪽에 위치한 정선을 A, 가장 남쪽에 있는 정선을 D 로 두었으며, 제주도에 가까운 순서로 1 번(서쪽)부터 5 번(동쪽)까지의 번호를 부여하였다. 이 자료는 1m 간격으로 측정되었다(Fig. 2.4).

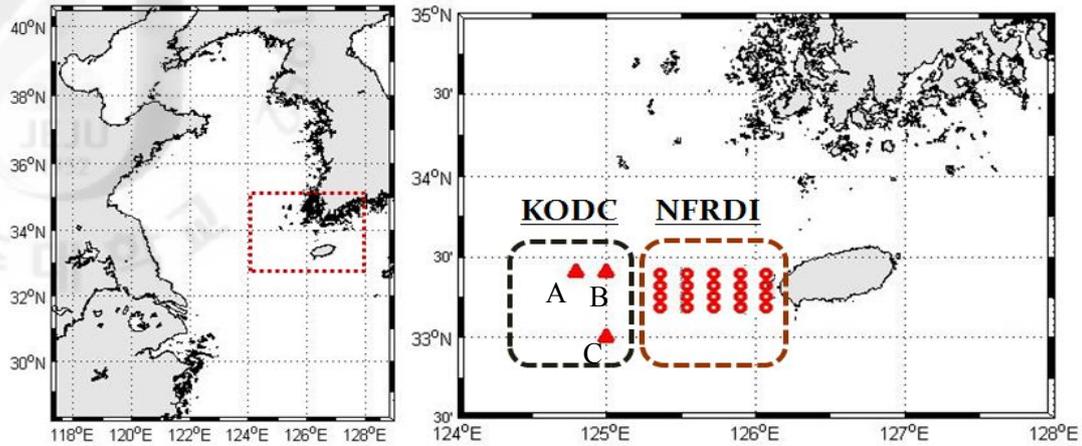


Fig. 2.3. Data acquisition sites for analysis and sound propagation modeling. Three sites from KODC (Korea Oceanographic Data Center) online service are marked with triangles(A: 313-08, B: 313-07, C: 314-10) and 20 sites from NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute) are marked with circles.

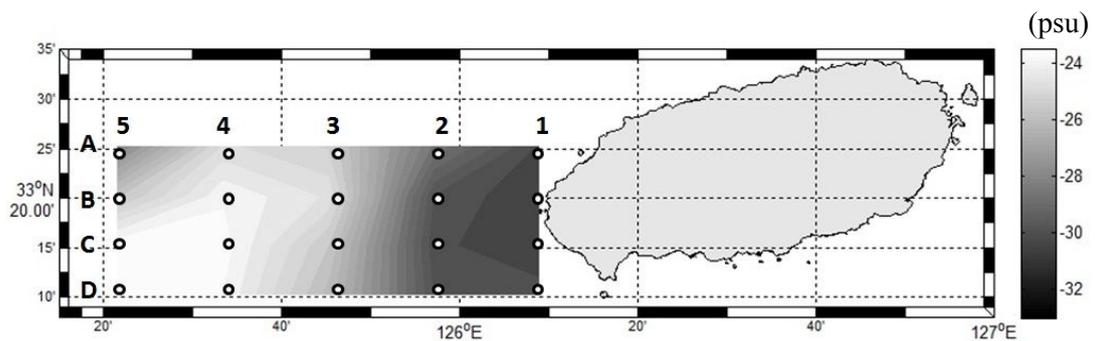


Fig. 2.4. Location of data acquisition sites (by NFRDI in Aug 1, 2010). 20 sites in western sea of the Jeju-Island were selected. The gray contour means salinity distribution on the surface in the area.

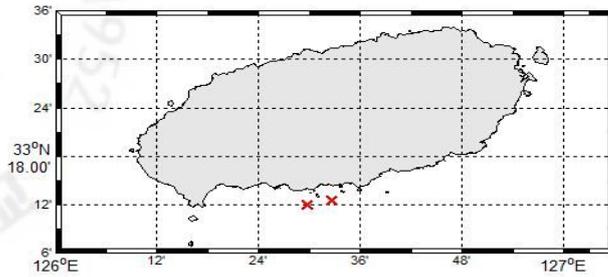


Fig. 2.5. Data acquisition sites. Two sites in south coast of Jeju Island are marked by X.

저염분수의 출현과는 독립적으로, 해양에서는 수온변화에 의해 음속이 변하게 된다. 특히, 하루 동안에도 기온의 일변화 또는 조석에 의해 수온이 변하게 되는데 저염분수로 인한 음파전달의 변화는 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화에 비해 어느 정도인지를 파악해 볼 필요가 있다. 또한 저염분수가 존재하는 환경에서 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화는 저염분수가 없는 일반적인 환경에서 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화와 어떤 차이를 보이는지 비교해 볼 필요가 있다. 이를 위해 지난 2009년 7월 27일부터 28일 사이 제주 남부해역의 두 정점(A: 32.20N / 126.50E, B: 32.21N / 126.54E)에서 수온 및 염분의 일변화를 26시간 동안 1시간 간격으로 측정하여 음파전달 변화를 모의 하였다(Fig. 2.5).

저염분수 환경에서의 음파전달 변화

3.1 저염분수로 인한 음속의 변화

음속과 염분은 함수관계에 있으므로 일반적인 환경에 비해 염분이 크게 변하는 저염분수 환경에서는 염분 변화로 인한 음속변화를 예상할 수 있다. 해양에서 수심에 따른 음속의 변화는 음파의 전달 경로 변화에 영향을 주므로, 저염분수 발생으로 인해 음파전달이 어떠한 변화를 겪는지 알아보기 위해서 먼저 저염분수 환경에서 수심에 따른 음속분포의 변화를 살펴보도록 한다.

3.1.1 염분이 음속에 미치는 영향

해양에서는 음속이 수온과 염분 그리고 수심에 영향을 받는다. 그러나 음속 공식에 의하면 염분은 수온이나 수심에 비해 음속변화에 큰 영향을 주지 못한다. 뿐만 아니라 극지방을 제외한 많은 해양환경에서는 수온의 분포가 시간과 공간에 따라 큰 변화를 보이는 반면, 염분의 변화는 상대적으로 적기 때문에 염분의 시공간적 분포가 음속에 미칠 것을 고려해야 하는 환경은 거의 없다는 통념이 일반적이다. 그러나 이전 장에서 살펴보았듯이, 중국 양쯔강 하구 및 그 일대로부터 생성된 저염분수가 동중국 해역에서부터 제주도 인근해역에 까지 영향을 미친다는 것이 관측되어 오고 있다.

따라서 저염분수가 발생함으로써 음속은 얼마나 변하게 되며, 온도가 주는 영향에 비해 얼마나 큰 영향을 주는지 알기 위해 먼저 음속 공식을 통해 음속과 음속에 영향을 주는 인자들의 관계들을 살펴보고 저염분수 환경에서의 음속수직분포의 변화를 살펴 보았다.

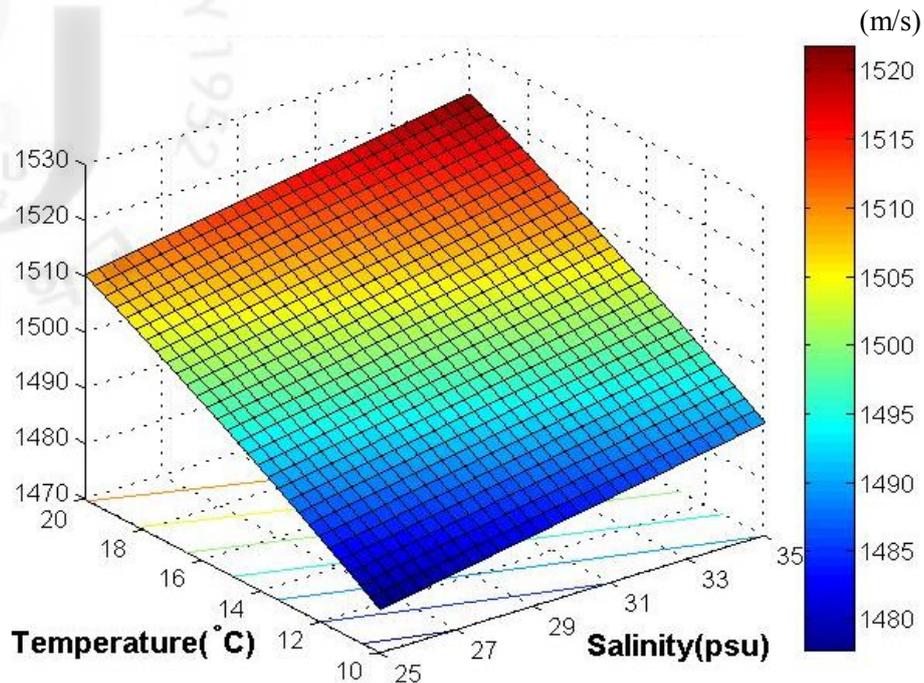


Fig. 3.1. Sound speed in the ocean at 10m depth where temperature and salinity are changed from 10 to 20 (°C) and from 25 to 35 (psu) respectively

Medwin(1975)의 음속공식에 의하면 음속(c)은 수온(T)과 염분(S)과 수심(z)의 함수로써 다음과 같이 표현된다[10].

$$c(T, S, z) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 + 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (1)$$

일반적으로 여름철 제주 서부해역의 혼합층 수심은 약 10m 내외 이다[22]. 혼합층 내에서 온도와 염분이 각각 10~20 °C, 25~35psu 사이의 범위를 갖는다고 가정할 경우 수심 10m 에서의 음속은 최소 1477.8m/s 에서 최대 1521.7m/s 까지 변화한다. Fig.3.1 를 보면, 주어진 범위 안에서는 음속은 거의 선형적으로 변하는데 수온이 10 °C 인 경우 염도가 35psu 에서 25psu 로 10psu 감소할 때 음속은 1490.2m/s 에서 1477.8m/s 로 12.4m/s 가 감소되며 수온이 20°C 의 경우 염도가 동일하게 변할 때 1521.7m/s 에서 1510.3m/s 로 11.4m/s 감소된다. 반면, 염분이 25psu 이고 수온이 20 °C 에서 10 °C 로 감소할 때 음속은

1510.3m/s 에서 1477.8m/s 로 32.53m/s 가 감소하며 염분이 35psu 일 경우 온도가 동일하게 변하면 1521.7m/s 에서 1490.2m/s 로 31.53m/s 감소한다. 수심에 따른 음속 변화는 수직에서도 알 수 있듯이 수심(m) 당 0.016m/s 로 천해역 혼합층 내에서의 영향은 매우 미약하다고 볼 수 있다.

3.1.2 저염분수가 음속수직분포에 미치는 영향

이번 절에서는 저염분수 발생으로 인한 염분 변화가 실제로 음속수직분포에 어떠한 영향을 끼치는지 알아보도록 한다. 먼저, 관측 해역에서의 저염분수 발생 현황을 정리하여 Fig.3.2 에 나타내었다. 그림은 관측 해역에서 1980 년부터 2009 년까지 30 년 동안의 8 월 표층염분을 나타내고 있다. 물론 8 월이 아닌 7 월이나 9 월 중에 저염분수가 발생했을 수도 있으나, 한국해양자료센터에서 제공하는 자료가 8 월을 포함한 격월로 제공되기 때문에 모든 달의 경우를 다룰 수 없었음을 밝힌다. 그러나 실제 저염분수가 발생했던 해와 그렇지 않은 해의 환경을 구분하여 비교하는 데는 무리가 없다. 세 정점에서의 표층염분을 살펴보면 이상 저염분수가 발생하였다고 여겨지는 해는 1989 년, 1996 년, 2003 년, 2004 년 그리고 2006 년이다(Fig.3.2). 비교적 근접한(10~20km) 정점들에서의 자료이므로 대체적으로 발생시기와 염분이 유사하게 나타나, 저염분수가 발생한 해라도 정점에 따라서 저염분수가 관측되지 않은 곳도 있음을 알 수 있다. 이는 저염분수가 수괴 형태를 이루어 이동한 결과라고 판단된다[18].

먼저 수직분포 형태의 다양성을 보기 위해 314-10 정점에서 1980 년부터 2009 년까지의 모든 수온수직분포와 염분수직분포를 그림 Fig.3.3(a), (b)에 나타내었다. 그리고 각 정점에서 이상저염분수가 발생되었다고 여겨지는 해를 제외한 모든 해의 수온수직분포 및 염분수직분포 평균과 표준편차를 구하였다(Fig. 3.3(c)실선, (d)점선). 반대로 이상저염분수가 나타난 해의 수심에 따른 염분을 평균하여 저염분수 환경에 대한 평균 염분수직분포를 구하였다(Fig. 3.3(d)실선). 이때 저염분수가 발생하지 않은 경우의 평균 표층염분은 약 31.5psu 이며 저염분수가 발생한 경우의 평균 표층염분은 약 25.6psu 로 나타났다.

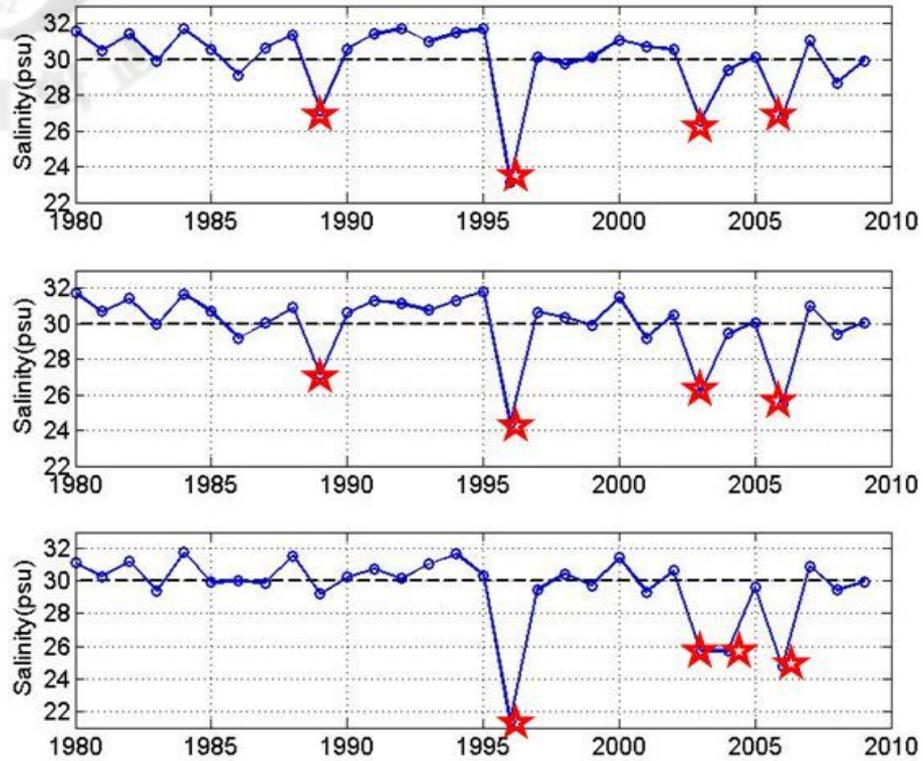
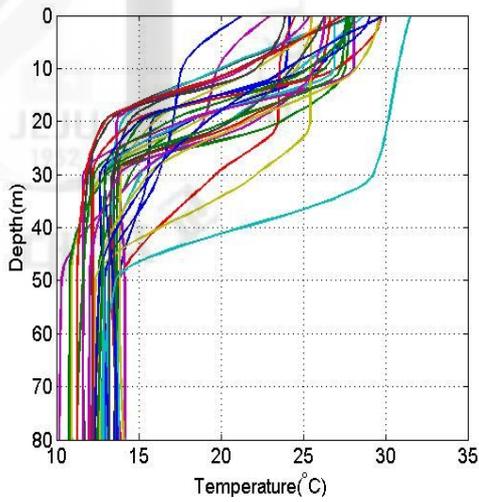
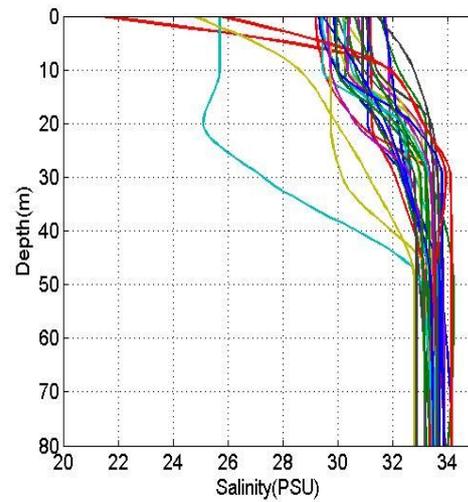


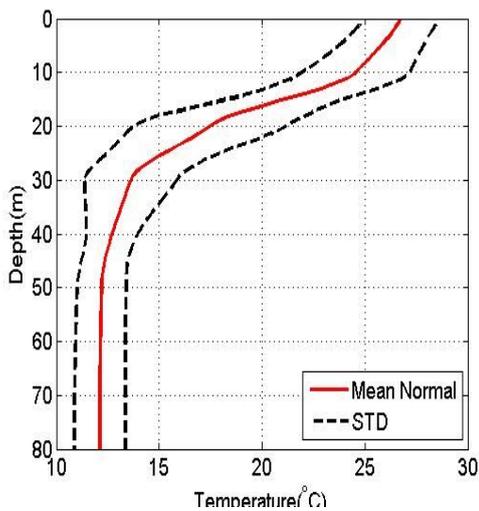
Fig. 3.2. Salinity in August for 30 years (from 1980 to 2009) at three sites provided by KODC online service(top: site A, middle: site B, bottom: site C in Fig.2.3). Very low salinity water was detected in 1989, 1996, 2003, 2004 and 2006(marked with star)



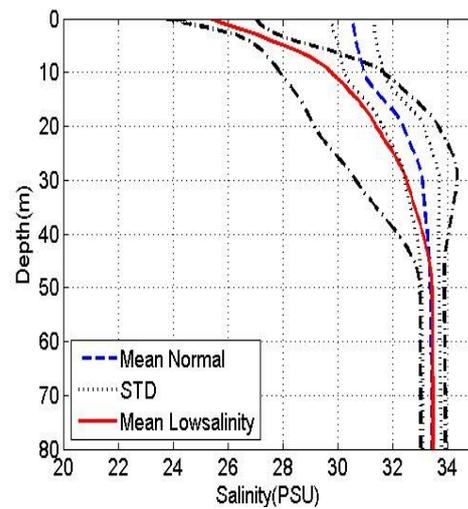
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.3. (a) and (b): Temperature and salinity profiles respectively for 30 years at 314-10 provided by KODC online service, (c): Temperature profile (solid line: mean data for 30 years, dashed line: standard deviation), (d) Salinity profiles (solid line: mean salinity data for low salinity environment (1989, 1996, 2003, 2004, 2006), dashed: mean salinity data for normal salinity of other years, dotted line and dash-dot line: standard deviation)

저염분수가 발생하지 않은 환경의 평균 수온 및 염분 수직분포를 이용하여 평균 음속수직분포를 계산하였고 이를 표준편차와 함께 나타내었다. 또한 저염분수로 인한 음속수직분포의 변화를 관찰하기 위해, 동일한 평균 온도수직분포에 저염분수가 발생한 환경으로부터 얻은 평균 염분수직분포를 적용하여 저염분수로 인해 변화된 음속수직분포를 구하였으며 이를 저염분수가 발생하지 않은 환경의 경우와 함께 나타내어 비교 하였다(Fig. 3.4).

평균 수온수직분포 및 염분수직분포를 이용하여 음속수직분포의 변화를 관찰해본 결과, 저염분수가 발생한 환경의 평균 염분수직분포의 영향으로 저염분수가 발생하지 않은 경우에 비해 표층에서의 음속이 크게 감소하였으며 그 변화량은 저염분수가 발생하지 않은 환경의 표준편차에 근접한 수준이라는 것을 확인할 수 있다. Fig.3.5 에 수심 20m 이내의 결과를 확대하여 나타내었다. 음속의 차는 수심 약 10m 에서부터 표층으로 갈수록 증가하며 표층에서 최대 약 5.56m/s 가 차이 나는 것을 확인할 수 있다.

앞서 음속에 미치는 저염분수의 영향을 평균적인 수직분포를 이용하여 확인해 보았다. 그러나 해양환경은 변수가 매우 많아 평균적인 수치를 이용한 분석만으로는 그 특성을 이해하는데 한계가 있다. 따라서 저염분수의 영향이 최대로 강하게 관측되었던 1996 년 8 월 5 일 314-10 정점에서의 결과를 분석하여 평균 수직분포와 비교 보면 다음과 같다. Fig.3.7 과 Fig.3.8 은 각각 온도 수직분포와 염분수직분포를 나타내며 표층 염분은 약 21.7psu 로 매우 낮은 염분을 나타내고 있다. Fig.3.9 의 음속수직분포는 표층에서 약 7m 까지 기울기가 양의 값을 갖는 것을 볼 수 있는데, 이전 결과로 미루어 보아 매우 강한 저염분수의 영향으로 표층에서의 음속이 급격하게 감소한 결과로 판단된다.

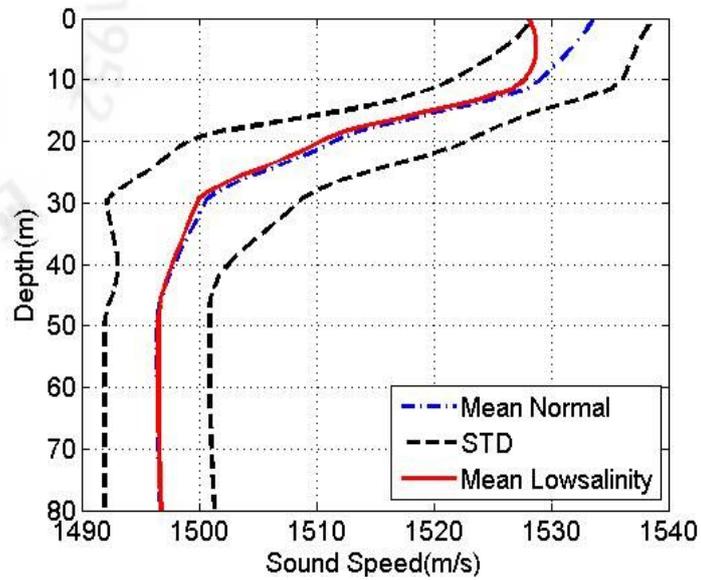


Fig. 3.4. SSPs (Sound Speed Profiles) (solid line: SSP of averaged low salinity environment, dash-dot and dashed line: SSP standard deviation of averaged normal salinity environment)

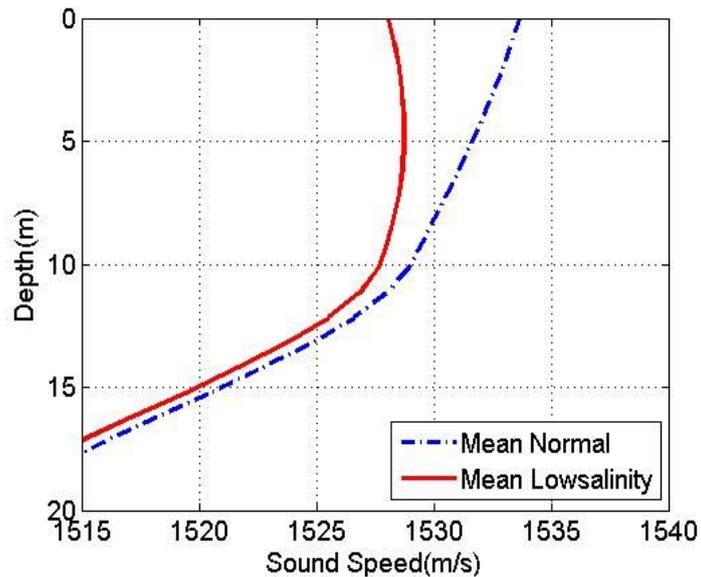


Fig. 3.5. SSPs(Sound Speed Profiles) from surface to 20m depth (solid line: SSP of averaged low salinity environment, dash-dot line: SSP of averaged normal salinity environment)

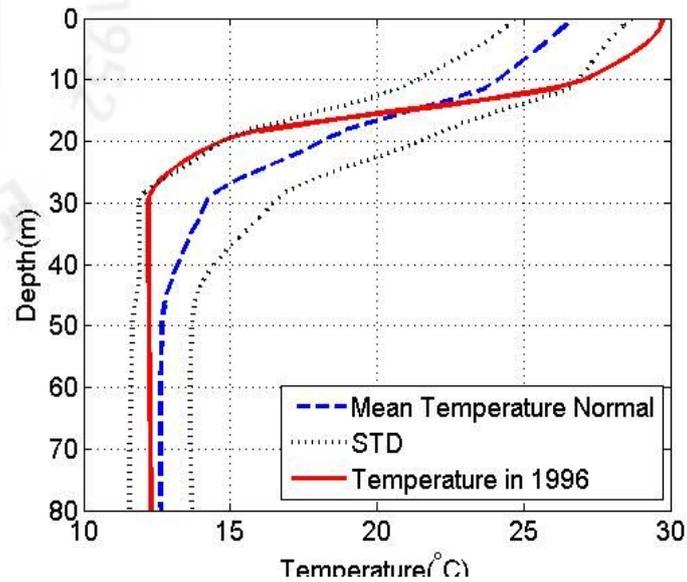


Fig. 3.6. Temperature profiles (solid line: temperature on Aug. 5th, 1996, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of temperature profile with normal salinity data, respectively)

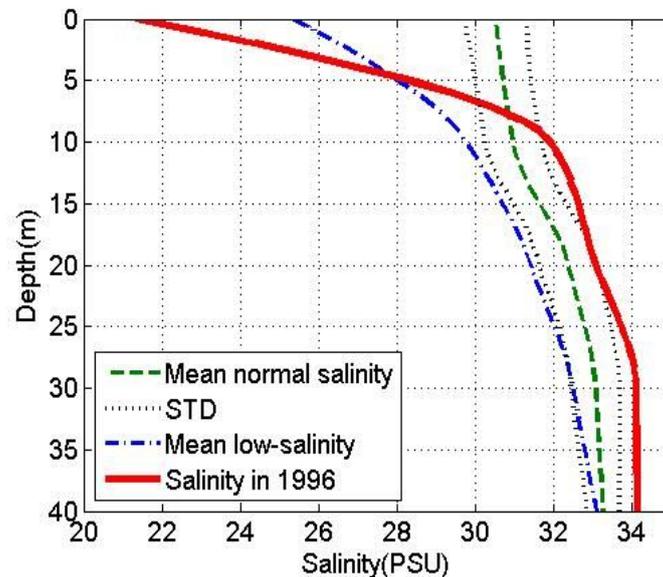


Fig. 3.7. Salinity profiles (solid line: salinity profile on Aug. 5th, 1996, dash-dot line: mean salinity profile of low salinity environment, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of salinity profile with normal salinity data, respectively)

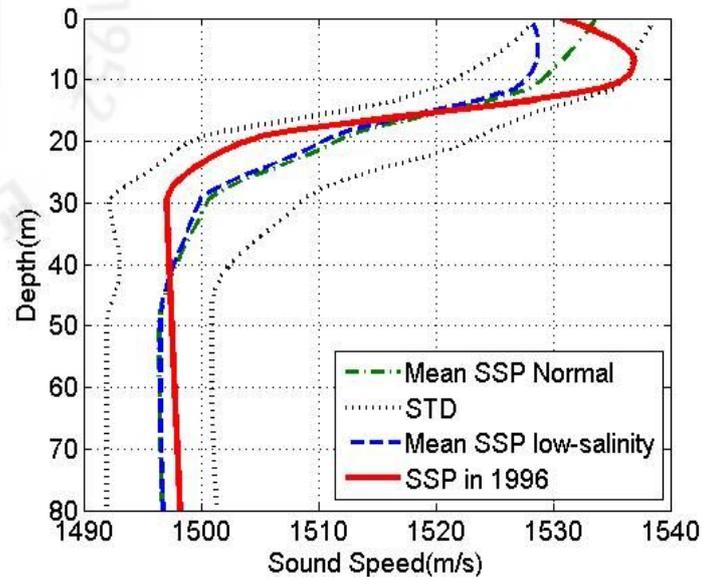


Fig. 3.8. SSPs(Sound Speed Profiles) (solid line: SSP on Aug. 5th, 1996, dash-dot line: mean SSP of normal salinity environment, dashed and dotted lines: mean and standard deviation of SSP with normal salinity data, respectively)

3.2 저염분수로 인한 음파전달 변화

해양에서는 음속분포의 형태에 따라 음파전달 경로가 변한다. 앞 절에서 살펴보았듯이 저염분수가 표층에서의 음속수직분포에 영향을 주므로 그에 따라 음파전달 경로에 변화가 있을 것을 예상해 볼 수 있다. 이번 절에서는 앞서 살펴본 두 가지 평균음속수직분포 환경과 1996년 8월 5일의 음속수직분포 환경에서 실제로 음파전달이 어떻게 변화하는지에 대해 알아보도록 한다.

3.2.1 음파전달 모델과 모의실험 환경

음파전달 변화를 살펴보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 모의실험을 하였다. 음파전달 모델로는 가우시안 빔(Gaussian beam)을 이용한 Bellhop 음선모델[26]을 이용하였다. 모의 실험을 위한 환경을 Fig.3.9에 나타내었다. 세 정점의 평균수심은 약 80m이며 거리에 따라 음속과 수심이 변하지 않는 거리 비중속 환경을 가정한다. 또한 앞서 살펴본 세 가지의 음속수직분포를 이용한다. 수중에서의 음파 전달은 기본적으로 음속수직분포를 포함한 해양환경에 영향을 받지만, 음원의 위치에도 영향을 받는다. 음원을 특정 수심에만 고정하고서는 해양환경의 특성을 모두 알 수 없기 때문에 음원의 수심을 변경해 가면서 결과를 살펴보았다. 다만 모든 수심에 대해서 살펴보기에는 한계가 있으므로 저염분수의 영향을 가장 많이 받는 표층부근(3m), 수심변화에 대한 음속변화율이 가장 큰 수온약층부근(20m) 그리고 음속이 수심에 따라 더 이상 변화하지 않기 시작하는 중층부근(40m)을 선택하였다.

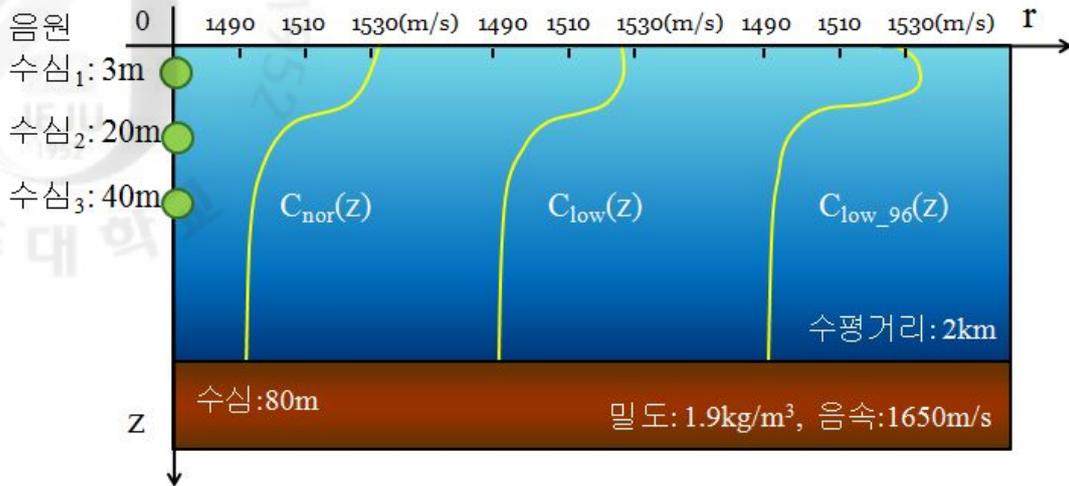


Fig. 3.9. Diagram of underwater environment for acoustic propagation model. Range independent environment is considered. Depth and range are 80m and 2km respectively. A source is located at 3m, 20m, and 40m depth.

3.2.2 저염분수로 인한 음파전달 경로 변화

앞서 설명한 모의 환경에서 음선모델을 이용해 음파전달을 모의한 결과는 다음과 같다. 효과적인 결과분석을 위해 음선의 각도는 $\pm 10^\circ$ 사이에서 1° 간격으로 설정하였다. 먼저 음원이 표층부근(3m)에 있는 경우를 살펴보면, 저염분수가 발생하지 않은 경우의 평균 음속수직분포 환경에서는 입사된 모든 음선이 하향굴절 하여 해저면으로 향하는 것을 볼 수 있다(Fig.3.10(a),(b)). 반면, 저염분수가 발생한 경우의 평균 음속수직분포 환경에서는 저염분수가 발생하지 않은 경우에 비해 표층부근에서의 굴절이 조금 덜 하며 거의 수평으로 입사되었던 음선중 하나가 해저면으로 굴절 되지 않고 표층에서만 반사와 굴절을 반복하며 전달되는 모습을 볼 수 있다(Fig.3.10(c),(d)). 이는 입사된 음파 에너지 중 일부가 수중의 다른 곳으로 빠져나가지 못하고 표층에 갇혀 전달되는 현상을 보여 준다. 비교를 위해 1996년 8월 5일의 경우를 살펴보면, 보다 많은 음선이 해저면으로의 굴절 없이 표층을 따라 전달되는 모습을 볼 수

있다(Fig.3.10(e),(f)). 이는 표층에서의 음속수직분포가 큰 양의 기울기를 가지기 때문에 발생하는 것으로 저염분수 환경의 평균음속수직분포를 적용한 경우에 비해 비교적 많은 에너지가 표층을 따라 전달된다는 것을 보여준다.

다음으로 음원이 수온약층부근(20m)에 있는 경우를 살펴보면 음원이 표층부근에 있는 경우의 결과와 마찬가지로 저염분수 환경의 평균음속수직분포를 적용한 결과가 표층에서의 굴절이 다소 약해진 것을 볼 수 있다(Fig.3.11(c),(d)). 그러나 표층부근이 아닌 표층 이외의 수심에서는 큰 변화를 볼 수 없다. 음선이 수온약층 아래에서 하향굴절 하려는 성질로 인해 다수의 음선이 표층을 지나지 않으므로, 이 경우 저염분수의 유무는 음선경로 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 1996 년의 경우는 모든 음선이 급격한 하향굴절로 인해 표층을 통과하지 않음으로써 평균 음속수직분포의 경우와 크게 다른 결과를 보이고 있는데, 저염분수로 인한 음속 변화는 수심 10m 이내의 표층부근에서 주로 발생하므로, 이 결과는 저염분수로 인한 것이라기 보다 기울기가 매우 급격한 수온약층으로 인한 결과라고 판단된다(Fig.3.9).

계속해서 음원이 수온약층 하단(40m)에 위치하는 경우를 살펴보면, 저염분수의 발생 유무와 상관없이 모든 음선이 수온약층 아래에서 전파되고 있으므로 이 경우는 저염분수의 유무가 음파전달에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다(Fig.3.12).

이러한 결과들을 종합해 보면, 음원이 표층부근에 존재할 때 저염분수의 유무가 음파전달 변화에 큰 영향을 미치며 이때 표층부근에 음파채널(Surface Sound Channel)이 형성될 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

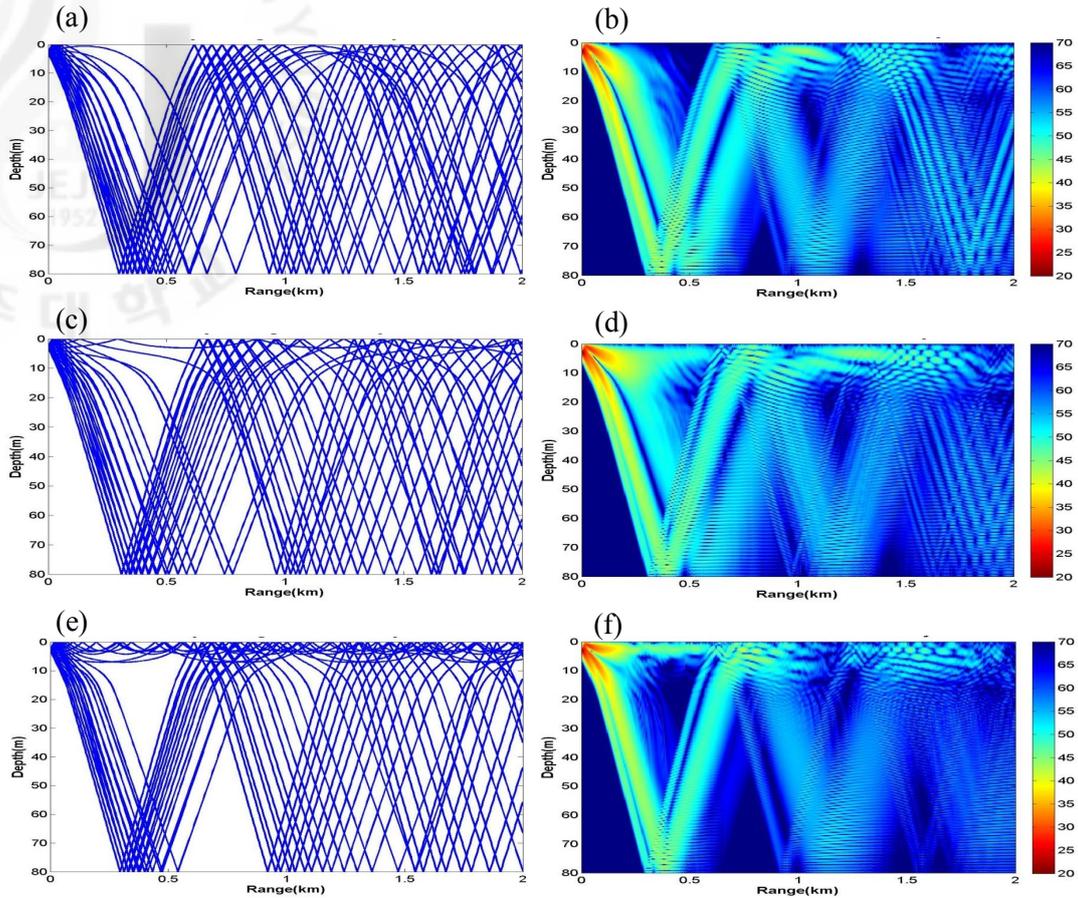


Fig. 3.10. Acoustic propagation results for source depth 3m. (a) and (b) are ray tracing and transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5th in 1996

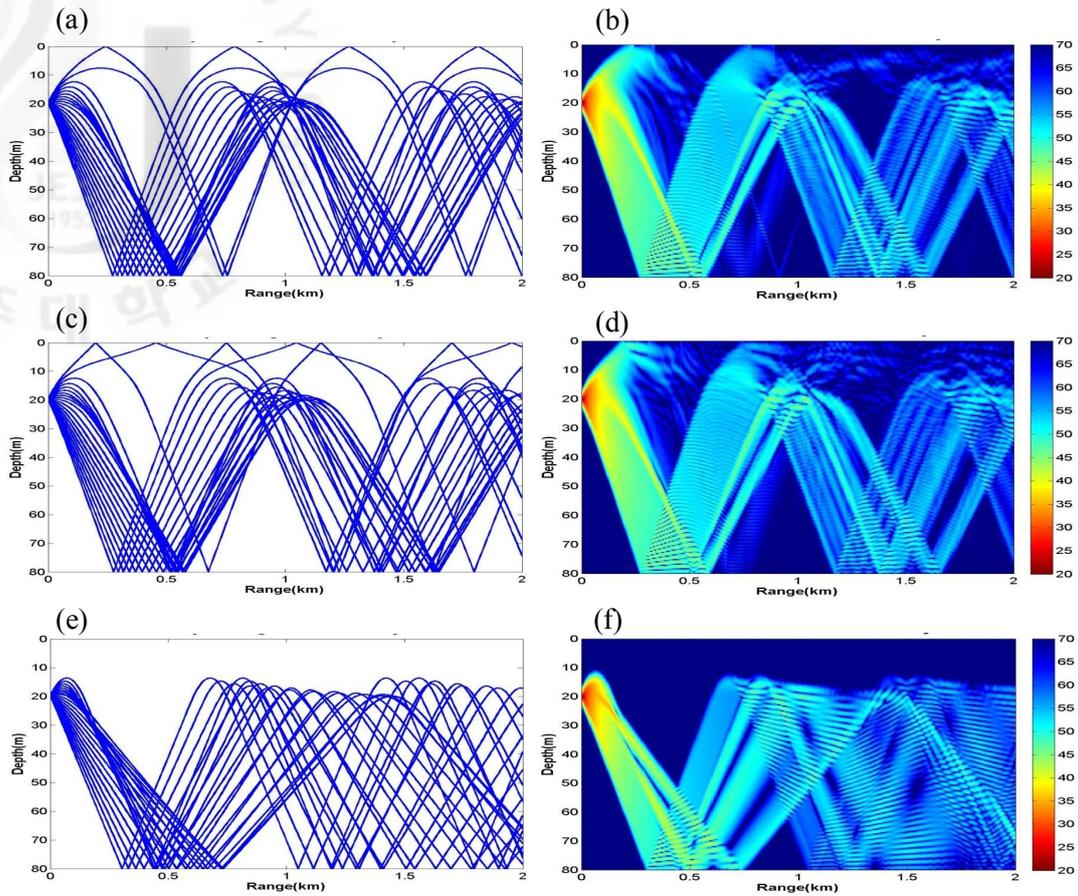


Fig. 3.11. Acoustic propagation results for source depth 20m. (a) and (b) are ray tracing and Transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5th in 1996

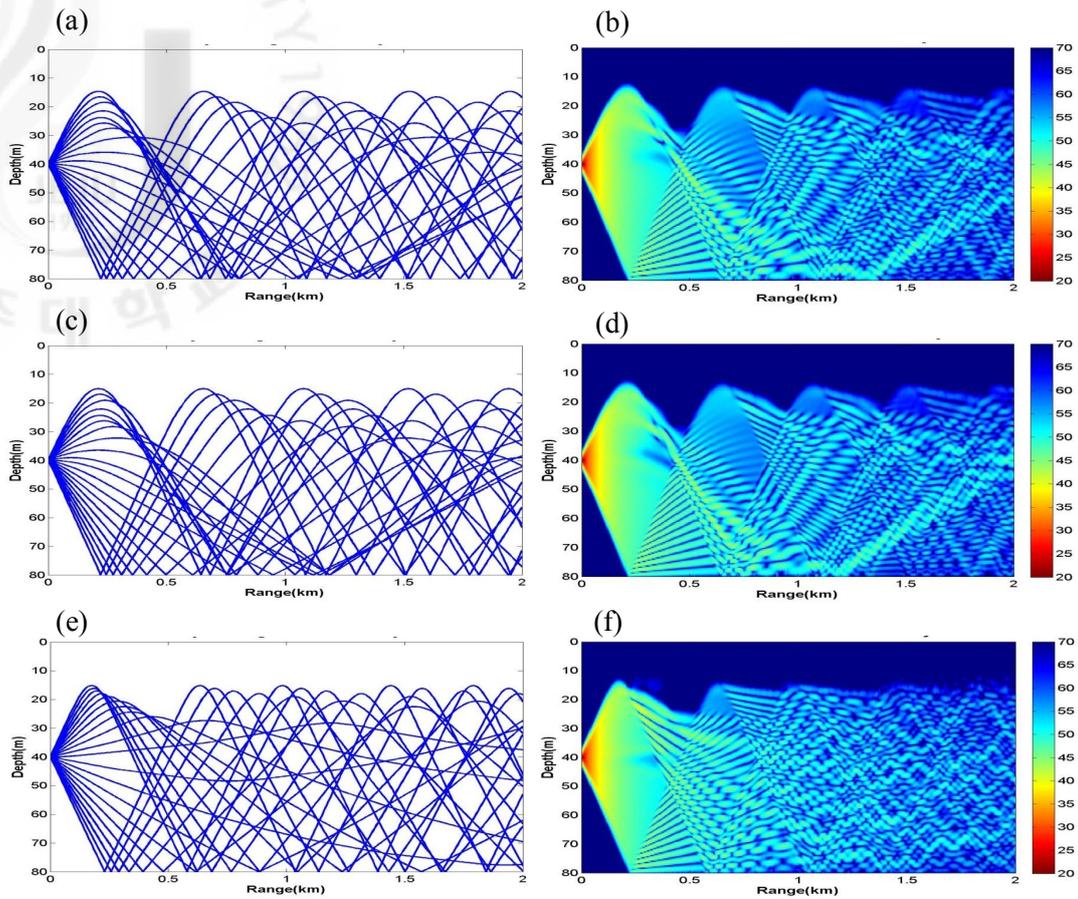


Fig. 3.12. Acoustic propagation results for source depth 40m. (a) and (b) are ray tracing and Transmission loss respectively for mean normal salinity environment, (c) and (d) are for mean low salinity environment, (e) and (f) are for specific environment of Aug, 5th in 1996

저염분수 환경에서의 표층채널 형성조건

제 3 장에서는 저염분수가 발생한 환경의 평균음속수직분포와 저염분수가 매우 강하게 기록되었던 1996 년 8 월의 자료를 이용하여 저염분수가 출현할 때에 발생할 수 있는 음파전달의 변화에 대해 살펴 보았다. 그 결과 음원이 표층에 존재하는 경우 표층 부근에 음파 채널이 형성될 가능성이 있다는 결과를 확인하였다. 그러나, 이러한 사실을 저염분수가 발생하는 모든 환경에 일반화 시키기에는 무리가 있다. 저염분수가 발생하면 표층 채널이 반드시 생성 되는지 그렇지 않은지, 염분이 어느 정도일 경우에 표층채널이 형성되는지에 대해서는 설명할 수 없기 때문이다. 따라서 이번 장에서는 보다 저염분수가 발생한 환경의 개별적인 경우를 살펴 봄으로써 저염분수 발생과 표층채널형성의 상관관계에 대해 보다 자세히 살펴보도록 한다.

4.1 자료 분석

저염분수의 발생과 표층채널 형성의 관계에 대해 알아보기 위해 먼저 실험 해역 자료로부터 표층채널 발생 현황을 조사하였다. 이를 위해서 제 2 장에서 언급하였던 정점에서의 자료를 이용하였다. 먼저 한국해양자료센터에서 제공하는 세 정점(A: 313-08, B: 313-07, C: 314-10 정점)에서 1980 년부터 2009 년까지 30 년간의 8 월 달 수심 별 수온, 염분자료를 이용해 분석하였으며(Fig.2.3) 국립수산과학원과 제주도청의 지원을 받아 2010 년 8 월 제주대학교 아라호를 이용해 측정한 제주 서부해역의 20 개 정점에서의 수심 별 수온, 염분자료를 이용하였다(Fig.2.3, Fig.2.4).

관심 해양환경의 특성을 보다 다각적으로 분석해 보기 위해 몇 가지 특성을 조사하였는데, 그 특성은 다음과 같다.

1. 표층염분

2. 표층음향채널의 수심

3. 음선의 최대 임계각

표층염분을 통해 해당 환경에서 얼마나 강한 저염분수가 출현했는지를 파악할 수 있으며, 표층채널의 수심은 얼마나 두터운 표층채널이 생성되었는지를 나타낸다. 여기서 표층채널의 수심은 저염분수괴의 두께와 직접적인 관련은 없으며, 이는 온도와 염분수직분포의 상호작용에 의해 결정되는 것으로서 전적으로 음향학적 관점에서 음파가 채널을 형성하며 전달될 수 있는 수직 폭을 의미한다. 표층채널은 표층으로부터 특정수심까지 음속의 증가가 음파의 굴절을 야기하면서 발생하는 것으로서, 채널의 두께는 표층에서부터 수심에 따라서 증가하던 음속이 변곡점을 지나 다시 감소하기 시작하는 구간까지를 말한다. 이를 위해 수집된 자료로부터 계산된 음속 수직분포를 수심에 따라 미분하여 그 기울기를 구했고, 기울기가 양에서 음으로 변하는 수심을 찾아 내었다.

음선의 임계각은 해양의 표층이 충분히 잔잔하다고 가정하고 음원이 표층채널 안에 존재할 때 음원으로부터 발생한 음파가 채널의 경계에서 채널 안쪽으로 굴절되는 음선들 중 가장 큰 각도를 의미하며 음선 임계각보다 큰 각도의 음선은 채널 밖으로 빠져나가게 된다. 이것은 음속 수직분포의 기울기에 관련이 있으며 다음과 같이 정의한다[30].

$$\chi_{\max} = \left[\frac{2(c_h - c_0)}{c_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 χ_{\max} 는 최대 임계각, c_0 는 채널 축(일반적으로 최소 음속층, 표층채널인 경우 표층에서의 음속), c_h 는 채널의 경계 면에서의 음속을 의미한다(Fig.4.1). 그러므로 표층채널의 두께와 음선의 임계각을 알면 해당 환경에서 표층채널의 특성을 알 수 있다. 여기서 임계각이 크다는 것은 수심에 따른 음속차이가 크다는 것, 즉 음속의 기울기가 크므로 굴절이 크게 일어나며 그로 인해 음파가 채널 안에 더욱 잘 갇힐 수 있다는 것을 의미한다.

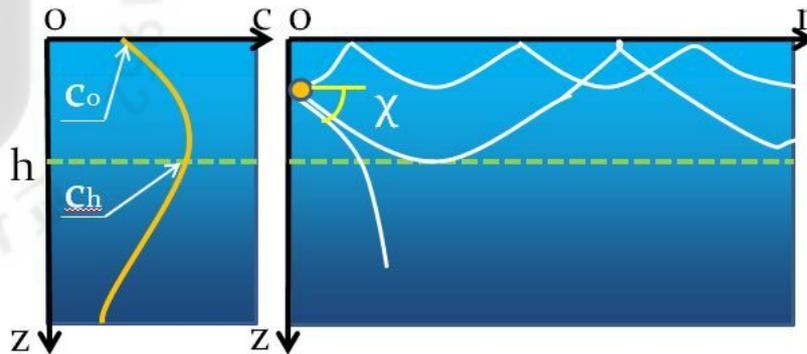


Fig. 4.1. Schematic diagram for ray spreading in SSC (Surface Sound Channel) (right) with SSP (Sound Speed Profile) (left). c_0 is minimum sound speed within channel which is called as channel axis, and h is the depth of channel border and c_h is the sound speed at h . The sound rays leaving a source are trapped in SSC within angle χ .

다음의 세 그림은 국립수산과학원 및 제주대학교에서 측정한 자료를 분석한 결과이다(Fig.4.2). 먼저 A(313-08)정점의 결과를 살펴보면 총 30년 중 열 두 해에서 표층채널이 발생한 것으로 관측된다. 한편, 이상저염분수가 발생한 해는 모두 네 차례(1989, 1996, 1993, 2006)인데 이 중 이상저염분수가 발생한 해는 모두 표층채널이 형성된 것을 볼 수 있다. 이상저염분수가 발생하지 않은 해에서 채널이 발생한 경우는 염분의 영향 없이 수온 수직분포의 영향으로 생성된 채널을 의미한다. 반면 음선의 임계각의 결과로 보아 저염분수로 인해 표층채널이 생성된 해는 표층채널이 보다 강하게 형성된다는 것을 알 수 있다. 이는 정점 B(313-07)에서도 마찬가지로의 결과를 나타낸다(Fig.4.3). 1996년과 2003년에 이상저염분수가 출현하였으며 이때 평년보다 강한 표층채널이 형성되는 것을 알 수 있다. 그러나 주목할 만한 점은 1989년과 2006년에도 표층염분이 매우 낮았음에도 불구하고 표층채널이 전혀 생성되지 않았다는 점이다. 정점 C(314-10)의 결과를 살펴보면 1996, 2003, 2004, 2006년에 이상저염분수가 발생하였으며 1996년과 2006년에 표층채널이 형성되는 것을 확인할 수 있다(Fig.4.4). 그러나 2003년과 2004년에는 표층염분이 매우 낮은

저염분수가 출현했음에도 표층채널이 생성되지 않은 것을 확인할 수 있다.

제 3 장의 결과들로 미루어 볼 때 저염분수가 표층채널을 형성하는 요인이라는 점을 알 수 있으나, Fig.4.2~Fig.4.4의 결과들은 표층염분이 매우 낮은 저염분수가 출현했다고 표층채널이 잘 형성되는 것이 아니라는 점을 말해주고 있다. 따라서 저염분수가 발생하는 환경에서도 저염분수 이외의 다른 요인이 표층채널 형성에 영향을 줄 수 있다는 점을 고려해 볼 수 있다. 그러나 표층채널은 음속의 구조변화에 의해 생성되며 음속은 수온과 염분 수심의 함수이므로 위의 결과는 염분의 영향뿐 아니라 수온의 영향도 있을 것이라는 점을 예측해 볼 수 있다. 따라서 다음절에서는 수온과 염분과 수심의 함수인 음속공식을 이용하여 이들과 표층채널과의 관계를 도출해 보기로 한다.

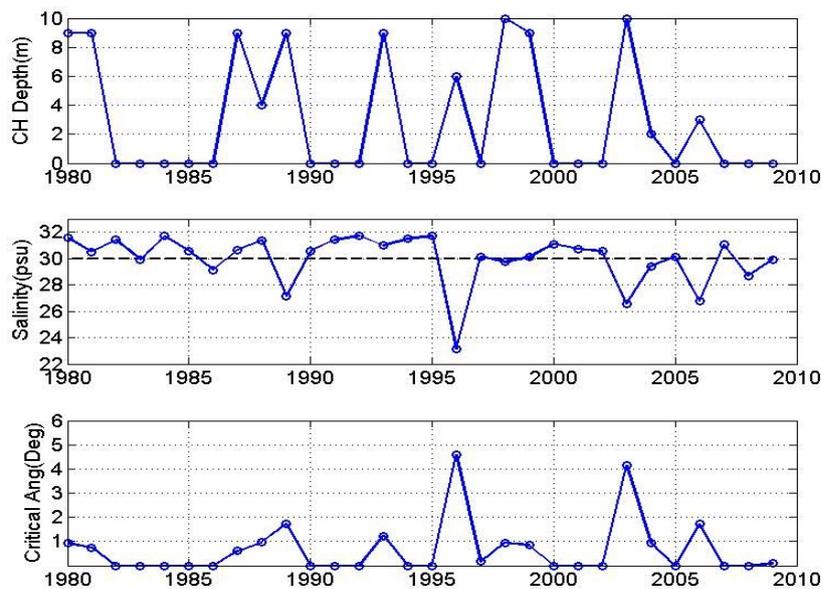


Fig. 4.2. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), and critical angle of ray (bottom) for 30 years at site B(313-07)

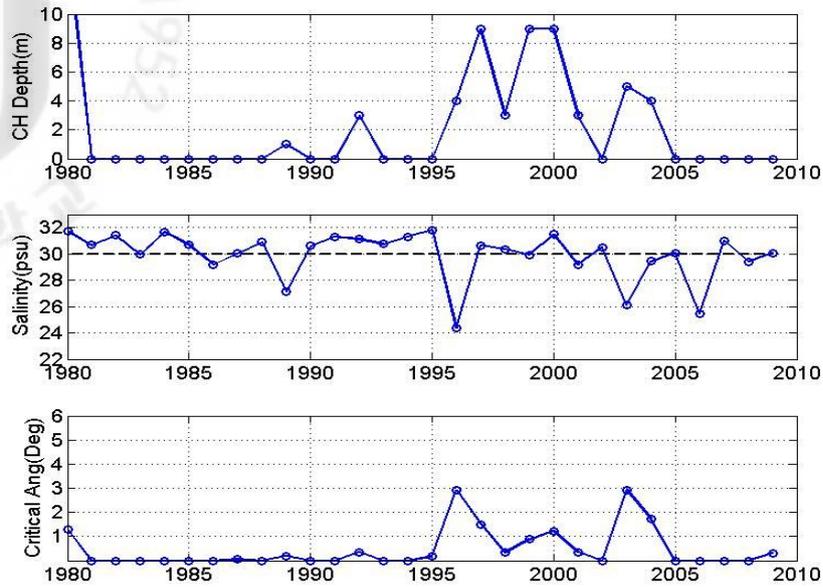


Fig. 4.3. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom) for 30 years at site B(314-10)

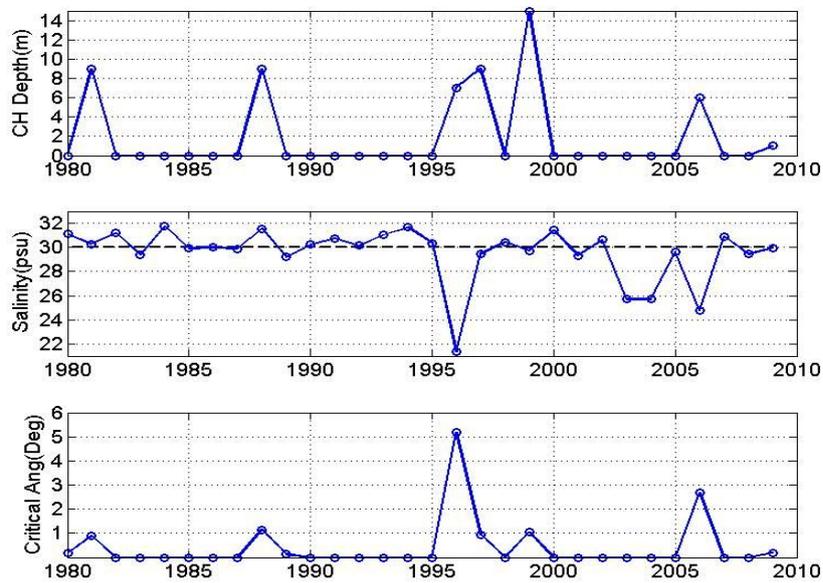


Fig. 4.4. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom) for 30 years at site C(314-10)

4.2 표층채널 형성 조건

표층채널은 음속이 수심에 따라서 증가할 때 발생되므로 음속 수직분포가 양의 기울기를 가져야 한다. 따라서 표층채널이 형성될 수 있는 조건으로 다음을 고려할 수 있다.

$$\frac{dC}{dz} \geq 0 \quad (3)$$

단, 이는 표층에서부터 수온약층 사이의 구간에서만 적용하며 해저면 부근에서 음압에 의해 음속이 증가되는 부분은 제외한다.

한편, Medwin(1975)의 음속공식은 식(1) 와 같으며 이는 수온과 염분 그리고 수심의 함수이다[10]. 음속의 기울기를 α 라 하고 Medwin 의 음속공식을 식 (3) 에 대입하여 풀면 다음과 같이 편미분 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC(T, S, z)}{dz} = \frac{\partial C}{\partial T} \frac{dT}{dz} + \frac{\partial C}{\partial S} \frac{dS}{dz} + \frac{\partial C}{\partial z} = \alpha \geq 0 \quad (4)$$

음속기울기가 특정 값(α)을 갖는 경우 각 항을 아래와 같이 표현하여 식을 간단하게 표현할 수 있다.

$$\frac{dC}{dz} = AT_g + BS_g + C = \alpha \quad (5)$$

위의 식에서 각 항은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial T} \equiv A = 4.95 - 0.11T + 0.00087T^2 - 0.01S \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial S} \equiv B = 1.34 - 0.01T \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} \equiv C = 0.016 \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dz} \equiv T_g, \frac{dS}{dz} \equiv S_g \quad (9)$$

여기서 T_g 및 S_g 는 각각 온도 수직분포와 염도 수직분포의 기울기 함수이다. 식 (6)에서 염분(S)의 차수는 온도(T)에 비해 작으므로 저염분수 발생으로 인한 변화량을 고려한다 해도 수온에 비해 큰 영향을 미치지 못한다. 따라서 이는 무시하거나 표층염분의 평균값으로 대체하여 상수화시킬 수 있다. 따라서 A, B 항 모두 온도만의 함수로 볼 수 있으며, S_g 를 좌변으로 두고 나머지 항을 우변으로 옮기면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$S_g = \frac{A(T)T_g + (C - \alpha)}{-B(T)} \quad (10)$$

식 (2)에 의해 표층채널 생성조건을 만족시키는 최소의 α 값은 0 이다. 따라서 위의 식 α 에 0 을 대입하면 식 (11)과 같다. 이는 곧 표층채널을 생성시킬 수 있는 최소조건 즉, 최소 음속수직분포 기울기를 형성하기 위한 온도 수직분포의 기울기 값에 따른 염도 수직분포의 기울기를 의미한다.

$$S_g = \frac{A(T)T_g + C}{-B(T)} \quad (11)$$

이를 그래프로 나타내면 Fig.4.5 와 같은데, 여기서 나타난 평면은 표층채널 형성 조건의 경계 면으로 볼 수 있다. 예를 들어 주어진 해양환경의 특정 수심에서 음속 수직분포가 양의 값을 갖는다면 그 수심에서의 수온 그리고 수온 수직분포의 기울기와 염분 수직분포의 기울기가 경계 면 상부의 공간상에 한 점으로 표시되는 것이다. Fig.4.5 의 결과를 값을 온도 수직분포의 기울기와 염분 수직분포의 기울기만의 2 차원 평면으로 나타내면 Fig.4.6 과 같다.

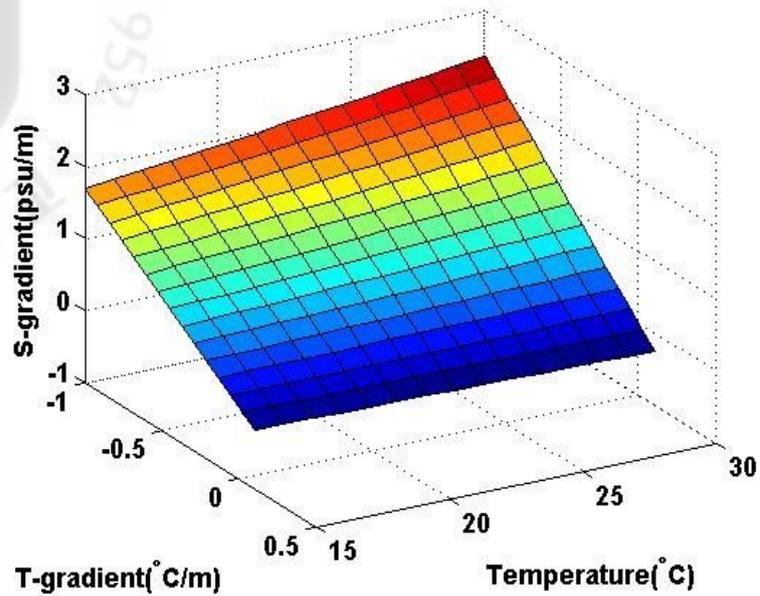


Fig. 4.5. Temperature-Salinity (T-S) gradient diagram with varying temperature (15°C to 30°C) where the gradient of sound speed profile is zero.

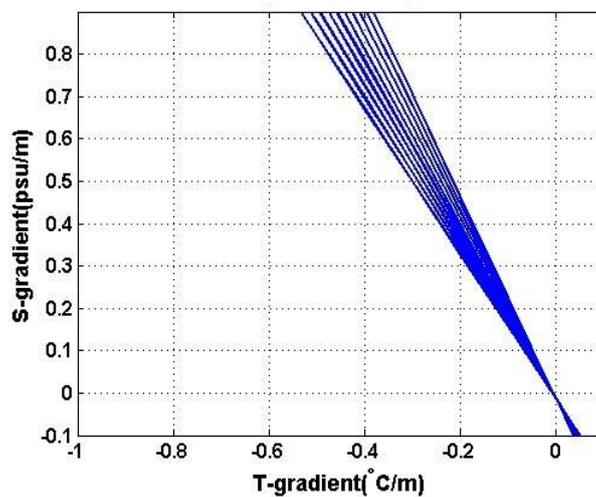


Fig. 4.6 Gradient of temperature and salinity with varying temperature (15°C to 30°C) in 2 dimension where the gradient of sound speed profile is zero. The slope becomes steeper as temperature increases (15°C to 30°C).

4.3 수온-염분 기울기 도표를 이용한 실측데이터 분석

제안된 수온-염분 기울기 도표에 실제 해양 자료를 적용해 보기로 한다. 저염분수가 존재하는 환경에서의 결과를 분석하기 전에 먼저 저염분수가 존재하지 않을 경우 수온-염분기울기의 도표는 어떠한 결과를 보이는지 살펴보았다. Fig.4.2~Fig.4.4 를 볼 때 1993 년의 경우 세 지점에서의 표층 염도는 각각 30.99, 30.78, 31.05psu 로써, 세 지점 모두 이상 저염분수는 발견되지 않았으므로 1993 년의 자료를 이용하였다. 세 지점에서 수심 0m ~ 10m 의 수온 및 염분을 이용하여 음속을 구하였고 식 (10)에 이들 값을 적용하여 도표에 나타내었다.

결과 분석에 앞서 1993 년 8 월 15 일 세 지점에서의 수온, 염분, 음속 수직분포를 살펴보았다(Fig.4.7). 수심 40m 이하에서 모든 수치의 값이 세 정점 모두 거의 같으므로, 편의를 위해 수심 40m 까지의 자료만 나타내었다. 세 정점에서의 수온 수직분포는 전형적인 제주 서부해역의 여름철 수직분포를 나타내고 있으며 혼합층이 잘 발달되어 있는 편이다. 표층에서부터 약 10m 까지 혼합층이 있으며 10m 에서부터 약 20m 까지 수온약층이 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 염분 수직분포 또한 10m 까지 혼합층을 이루며 20m 부터 30m 까지 염분약층이 존재한다. 그러나 이는 수온의 경우와 반대로 수심에 따라 증가하며 표층에서 중층 사이의 값은 약 3~4psu 의 차이를 보인다. 음속 수직분포의 경우 온도의 영향이 지배적이므로 온도 수직분포를 따라 형성되어있는 것을 볼 수 있다. 세 지점의 수직분포가 거의 비슷한 모습을 보이지만, A 정점(313-08)의 경우 혼합층에서의 수온 수직분포가 다른 두 지점보다 더욱 일정하며(0.04°C 차이) 따라서 수심에 따라 증가하는 압력의 영향으로 음속이 표층에서부터 수심 10m 까지 약간 증가하는 양상을 보이며, 이로 인해 Fig. 4.2 에서 볼 수 있듯이 음선 임계각이 그리 크지 않은(약 1°) 표층채널이 생성되었다. 이를 수온-염분 기울기 도표에 나타내면 Fig.4.8 과 같다. 이때 온도에 따라 변하는 표층채널조건 경계선은 표층에서부터 수심 10m 까지 온도의 평균값을 적용하여 나타내었다.

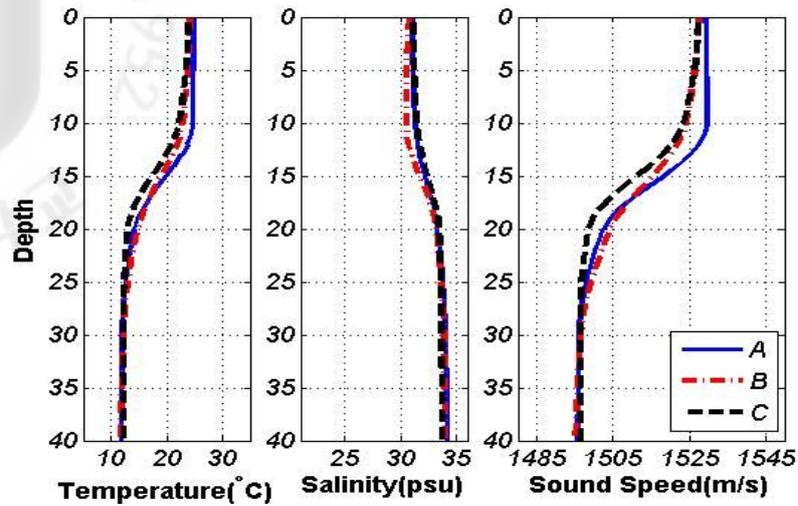


Fig. 4.7. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 15, 1993. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)

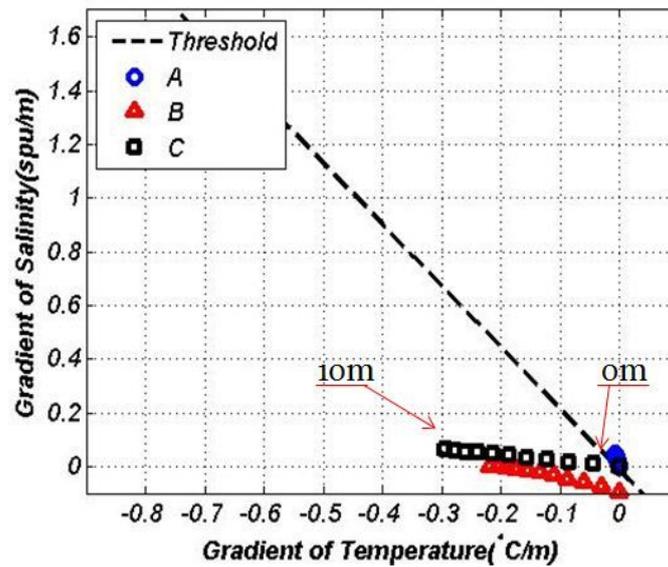


Fig. 4.8. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 15, 1993 at three sites indicated in Fig.2.3 (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C)

정점 A의 경우 Fig.4.7에서 볼 수 있듯이 온도와 염분 모두 10m까지의 기울기가 거의 0에 가까우며, 표층채널 경계선의 약간 상부에 표시되는 것으로 보아 약한 표층채널이 형성된 것을 잘 나타내주고 있다. B와 C지점에서는 수온 수직분포의 기울기가 약 $-0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 까지 변하고 있으며 수심에 따라 점들이 경계 면에서 멀어지고 있는 것을 볼 수 있다. 중요한 점은 세 지점 모두 염분 수직분포의 기울기 변화가 거의 없으므로 y축으로의 변화 또한 거의 없다는 점이다.

다음으로 저염분수가 존재하는 환경을 살펴보기 위해 2003년과 2006년의 자료를 적용하였다. 먼저 2003년의 수온, 염분, 음속 수직분포를 살펴보면 Fig.4.9와 같다. 수온 수직분포의 경우 1993년의 자료와 유사하거나 혼합층이 약하게 나타나는 정도로 차이를 보이지만, 염분 수직분포의 경우 표층염도가 약 26psu 정도로 매우 낮은 수치를 보이고 있으며 그에 따라 기울기도 1993년에 비해 매우 커졌음을 볼 수 있다. 이러한 값들을 이용해 나타낸 수온-염분 기울기 도표를 살펴보면 Fig.4.10과 같다.

Fig.4.8과 달리 표층에서 수온과 염분 수직분포의 기울기 값들이 모두 수심에 따라 크게 변하고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 저염분수의 영향으로 인해 염분 수직분포의 기울기 값들이 표층에서부터 큰 값들을 보이며 A와 B지점에서는 점들이 표층채널 조건 경계선을 넘어서는 것을 확인할 수 있다(Fig.4.10). A의 경우 10m이내의 값들이 모두 경계선 너머에 있으며, B의 경우 수심 5m까지 표층채널이 형성된 것으로 나타난다. C지점의 경우 다른 두 지점과 마찬가지로 염분이 매우 낮게 관측되고 있으며 그 기울기도 매우 큰 편이나 그에 비해 온도 수직분포의 기울기가 음의 값으로 더 크기 때문에 따라서 평면상의 점들이 표층채널 경계선을 넘지 못한 것으로 보인다.

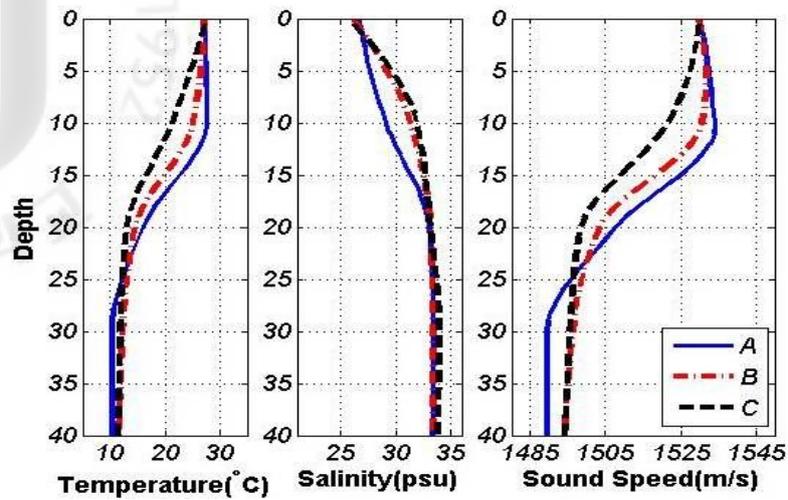


Fig. 4.9. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 12, 2003. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)

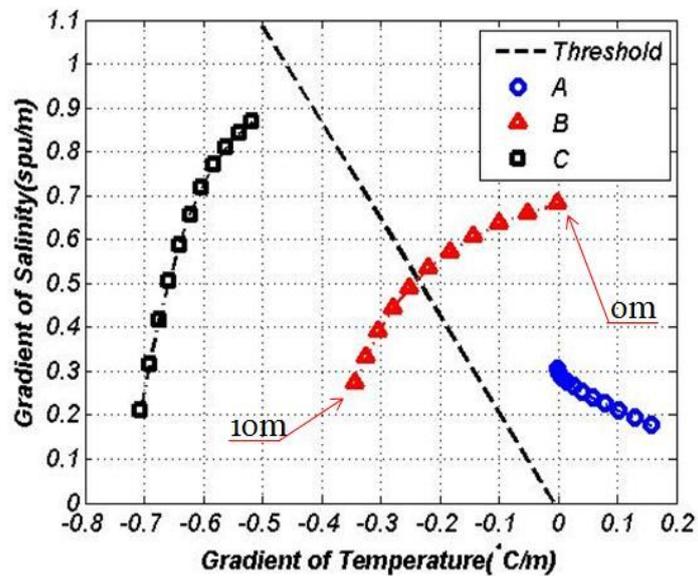


Fig. 4.10. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 12, 2003 at three sites indicated in Fig.2.3. (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C)

2006 년의 경우를 Fig.4.11 와 Fig.4.12 에 나타내었다. 전반적으로 2003 년과 비슷한 결과를 볼 수 있다. 온도 수직분포의 기울기가 상대적으로 작으며 염분 수직분포의 기울기가 큰 정점 A 와 C 의 경우 표층채널이 형성되었으며 온도 수직분포의 기울기가 음의 값으로 큰 정점 B 의 경우는 표층채널이 형성되지 않은 것으로 보인다.

표층채널 형성 유무의 확인 및 수온-염분 기울기 도표 결과의 검증을 위해 2003 년의 환경변수를 음과전달 모델인 음선모델에 적용하여 모의실험을 실시하였다. A, B, C 세 정점에서의 음속 수직분포를 적용하였으며, 음원의 수심은 1m 이고 $\mp 10^\circ$ 의 음선 1° 간격으로 구하여 그림에 나타내었다. 음선 경로 또한 수직분포의 경우와 마찬가지로 주로 표층부근에서 변화가 나타나므로 0~40m 까지만 나타내었다. 그 결과 수온-염분 기울기 도표의 결과와 같이 정점 A 에서 강한 표층채널이 형성되었으며 이때의 표층채널 두께는 10m, 음선의 임계각은 4.47° 로 나타났다. 정점 B 에서도 수온-염분 기울기 도표에서 나타나는 바와 같이 저염분수로 인해 표층채널이 형성 되었으며 표층채널의 두께는 5m, 음선의 임계각은 2.94° 로 나타났다. 반면 정점 C 에서는 수온-염분 기울기 도표에서 볼 수 있듯이, 표층채널이 형성되지 않았다.

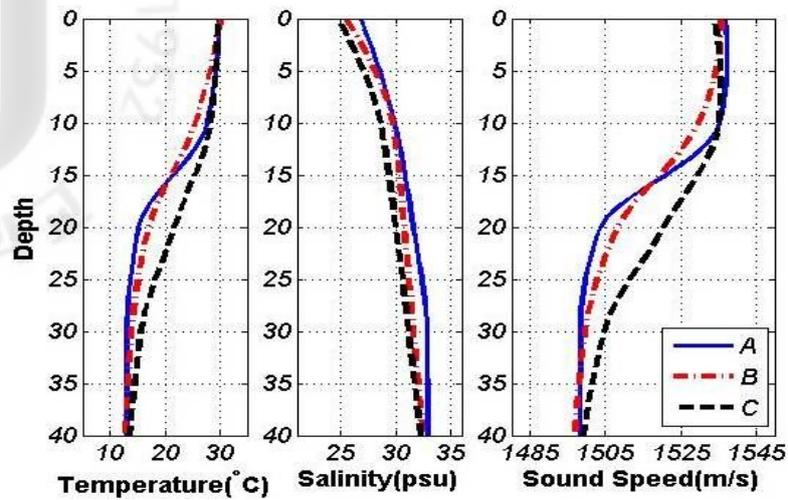


Fig. 4.11. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 12, 2003. Profiles from surface to 40m depth are shown for convenience. (solid line: site A, dashdot line: site B, dashed line: site C)

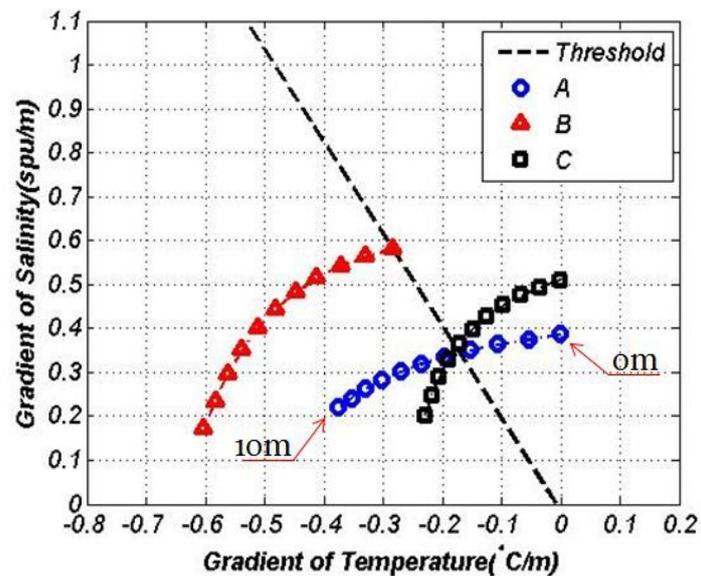


Fig. 4.12. T-S gradient diagram for three sites on Aug. 12, 2003 at three sites indicated in Fig.2.3. (dashed line: averaged threshold line, circle: site A, triangle: site B, square: site C)

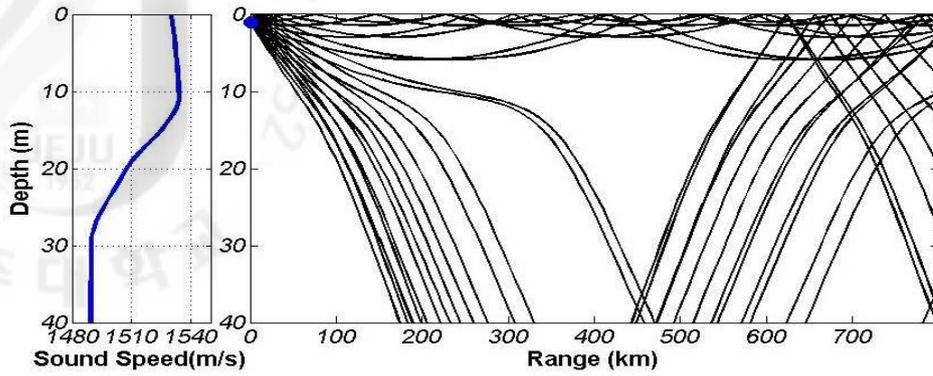


Fig. 4.13. Ray tracing result for site A on Aug. 12, 2003. (Channel depth:10m, critical angle of ray: 4.47°)

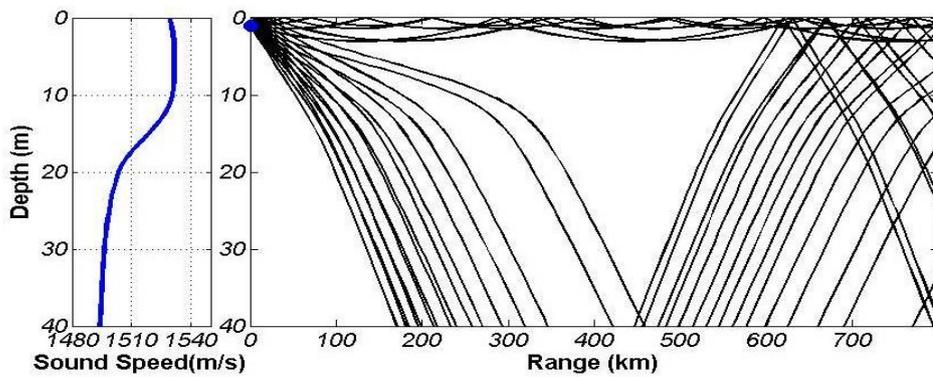


Fig. 4.14. Ray tracing result for site B on Aug. 12, 2003. (Channel depth:5m, critical angle of ray: 2.94°)

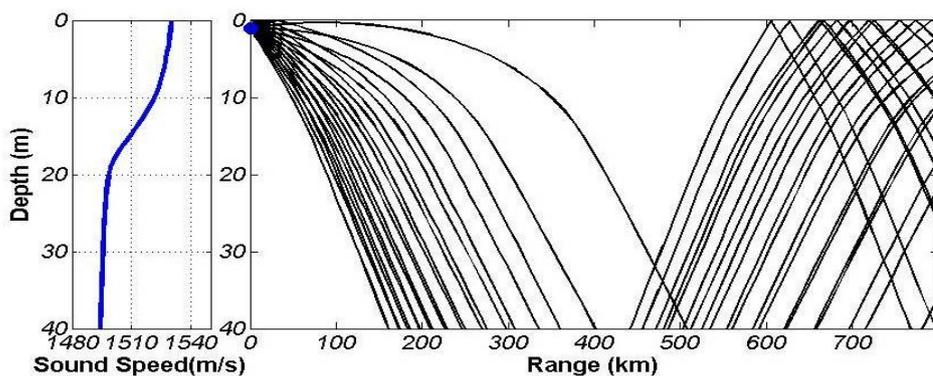


Fig. 4.15. Ray tracing for site C on Aug. 12, 2003 (No surface channel).

Fig.2.4 의 표층염분 분포를 보면 측정영역 남서쪽에 저염분수가 강하게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이전 절의 자료분석 결과와 마찬가지로 주목할만한 점은 매우 낮은 염도를 보이고 있는 지점에서 표층채널이 형성되지 않는 경우가 발생 한다는 점이다(Fig.4.16). 현상을 해석하기 위해 B4, C4, D4 정점을 선택하여 그 결과를 비교해 보았다. 각 정점은 저염분 수괴의 중심부분에 위치하고 있으며 세 정점 모두 표층 염도가 매우 낮다. 각각의 수온, 염분 및 음속 수직분포를 Fig.4.17, Fig.4.19, Fig.4.21 에 나타내었으며 그에 따른 수온-염분 기울기 도표를 Fig.4.18, Fig.4.20, Fig.4.22 에 나타내었다. 정점 B4 의 경우 표층염도 수치가 매우 낮은 정점임에도 불구하고 표층채널이 생성되지 않은 정점이다. 이를 온도-염도 기울기 도표에서 보면 해수면에서부터 수심 10m 까지 1m 단위로 계산된 기울기 값들이 6m 지점만 제외하고 모두 표층채널조건 경계선을 넘지 못하는 것으로 나타났다(Fig.4.18). 그 원인은 표층염분은 매우 낮으나 수심 10m 까지의 기울기는 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 정점 C4 의 경우 수심 2m ~ 4m 사이에서 염분 수직분포의 기울기가 매우 크다(Fig.4.20). 이로 인해 수온-염분 기울기 도표상의 수심 3m, 4m 지점에 해당하는 점들이 표층채널조건 경계선을 넘었다. 5m ~ 9m 사이의 값들은 염분 수직분포의 기울기가 작으나 수온 수직분포의 기울기 역시 상대적으로 작아 표층채널 경계선을 넘거나 경계상에 존재하는 것을 볼 수 있다.

정점 D4 의 경우 역시 표층부근에서 염분 수직분포의 기울기가 크며 상대적으로 온도 수직분포의 기울기가 작은 것을 볼 수 있다(Fig.4.22). 그로 인해 0m, 3m, 4m, 5m 에서 표층채널조건 경계선을 넘었다.

B4, C4, D4 각 정점에서 표층채널 형성유무를 검증하기 위해 이전 절과 같은 방법으로 음선모델을 적용시켜 보았다. 각 정점의 음속 수직분포(Fig.4.17, Fig.4.19, Fig.4.21)를 적용하였으며, 음원의 수심은 1m 이고 $\mp 10^\circ$ 의 음선을 1° 간격으로 구하여 그림에 나타내었다. 그 결과 수온-염분 기울기 도표 결과에서 나타나는 바와 같이 D4 와 C4 정점에서 표층채널이 형성되었다(Fig.4.23, Fig.4.24). D4 의 경우 표층채널 두께는 6m, 음선의 임계각은 3.41° 이며 C4 의 경우 표층채널 두께는 8m, 음선의 임계각은 2.04° 로 나타났다. 그러나 B4 의 경우 표층채널이 생성되지 않았다(Fig. 4.25).

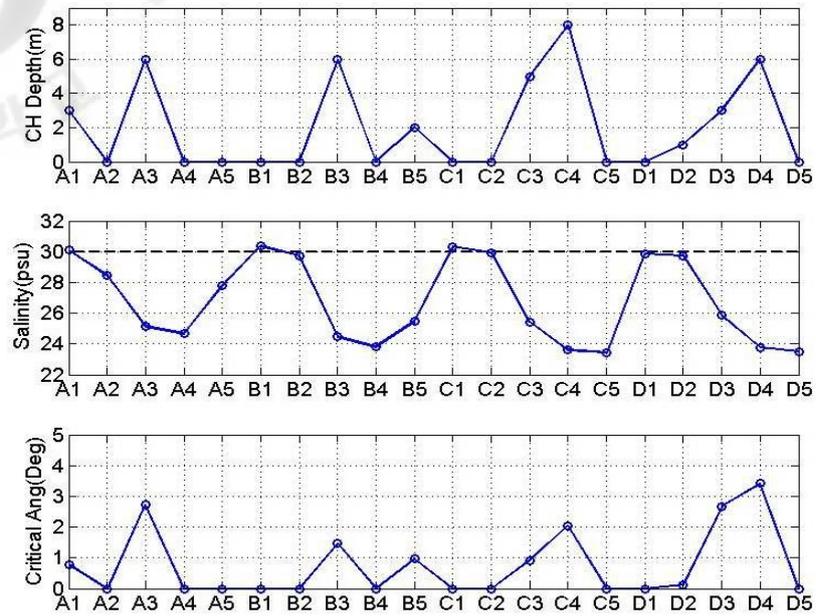


Fig. 4.16. Data analysis results for JNU data of 20 sites. Channel depth (top), salinity of ocean surface (middle, dashed line: 30psu), critical angle of ray (bottom)

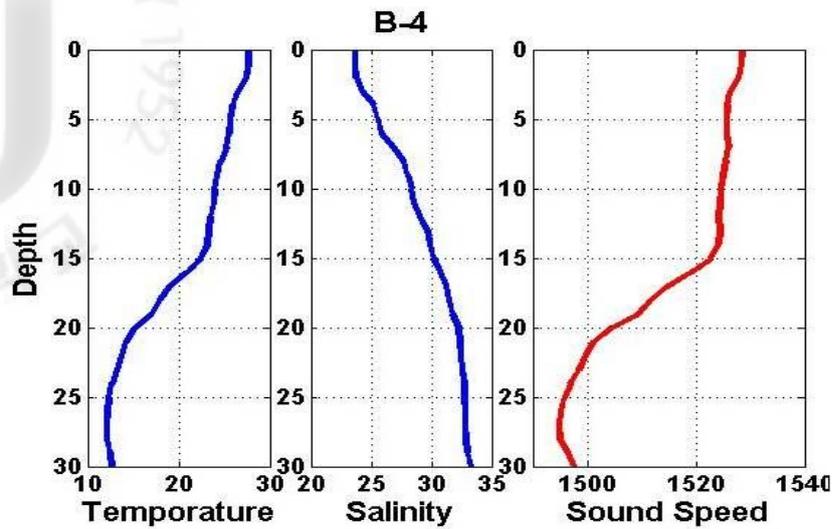


Fig. 4.17. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 1, 2009 at B4. Profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right)

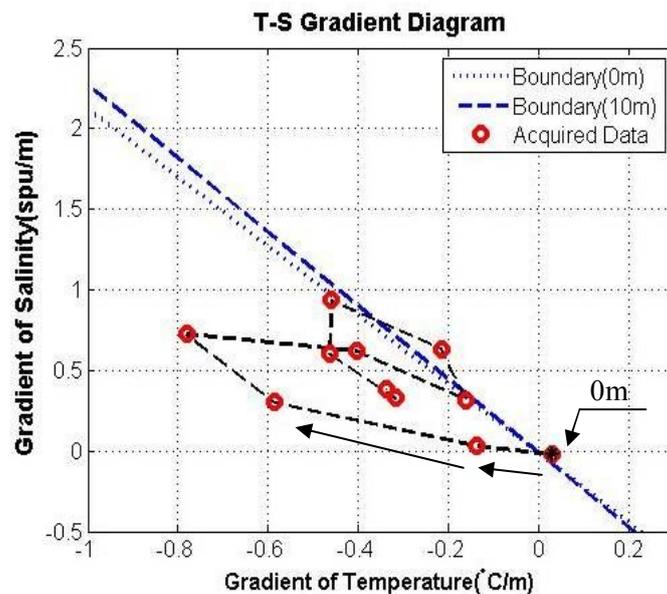


Fig. 4.18. T-S gradient diagram from profiles of Fig.2.4 measured on Aug. 1, 2010 at B4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradients of temperature and salinity value with depth from surface to 10 m for every 1 m)

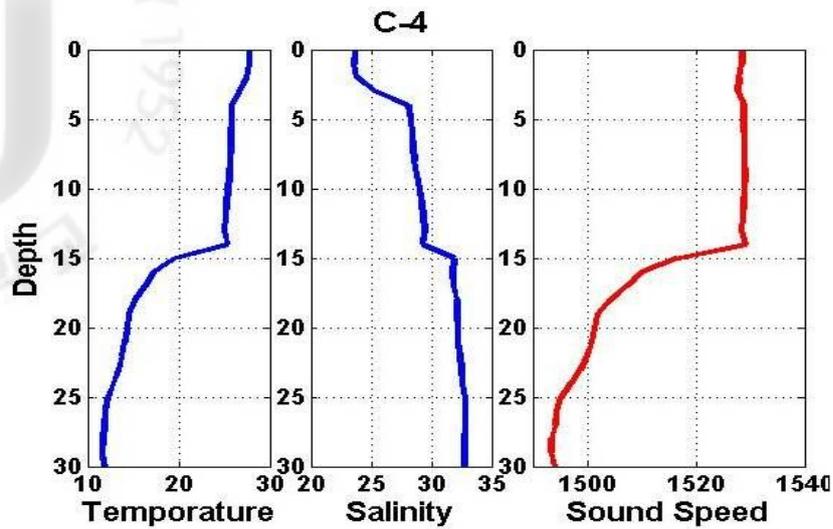


Fig. 4.19. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug. 1, 2009 at C4. Profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right)

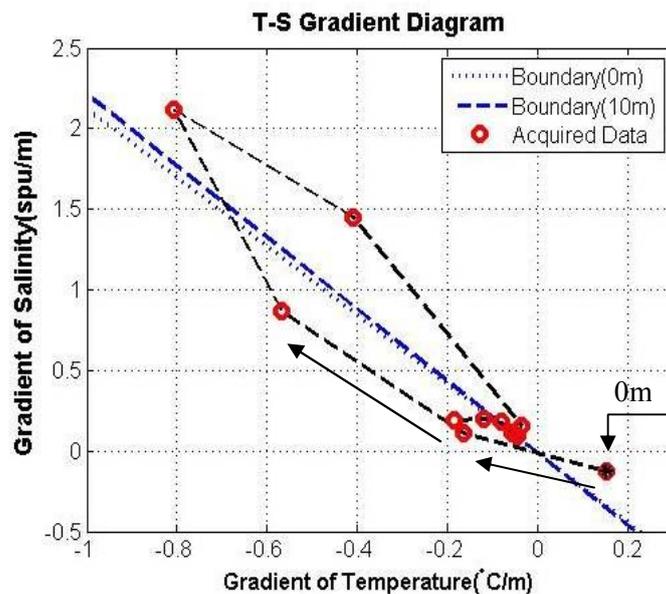


Fig. 4.20. T-S gradient diagram result from profiles of Fig.2.4 measured on Aug. 1, 2010 at C4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradients of temperature and salinity with depth from surface to 10 m every 1 m)

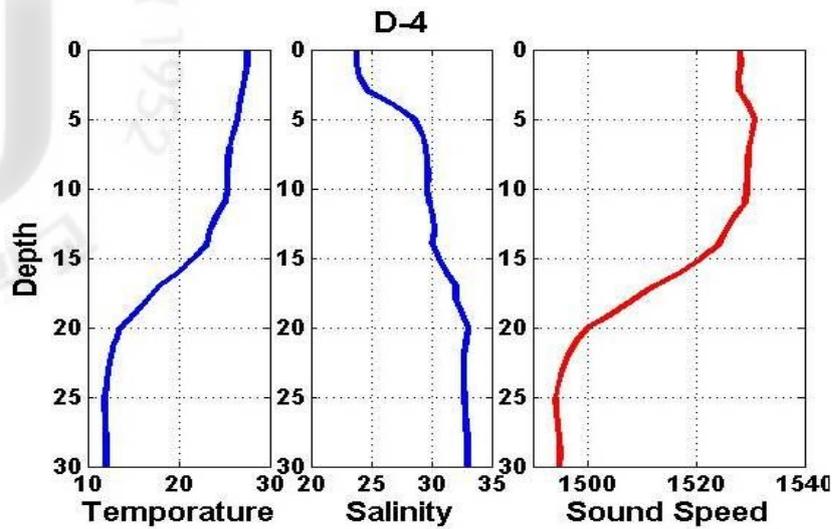


Fig. 4.21. Temperature, salinity and sound speed profiles with depth measured on Aug.1.2009 at D4. Only profiles from surface to 30m depth are shown for convenience. Each profile shows temperature (left), salinity (middle) and sound speed (right)

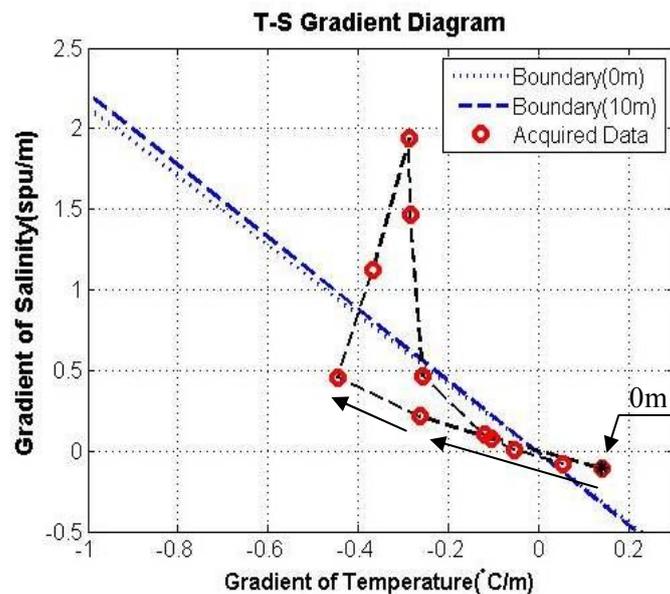


Fig. 4.22. T-S gradient diagram result from profiles of Fig.2.4 measured on Aug.1.2010 at D4. (dotted line: threshold line for temperature on surface, dashed line: threshold line for 10m depth, circle: gradienst of temperature and salinity with depth from surface to 10 m every 1 m)

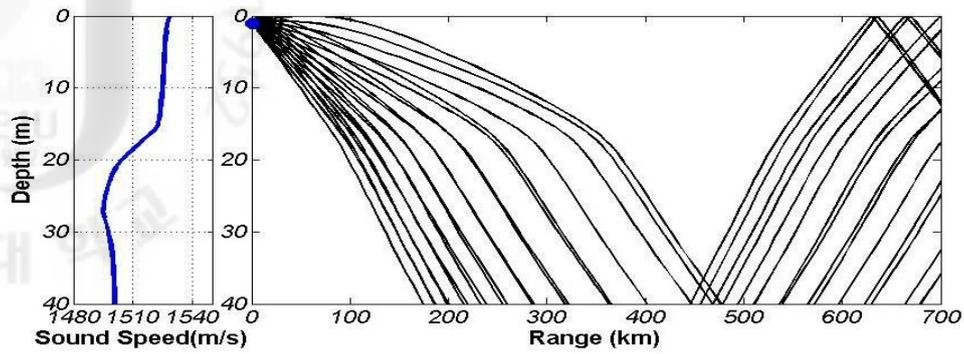


Fig. 4.23. Ray tracing for site B4 on Aug. 1, 2010. (No surface channel).

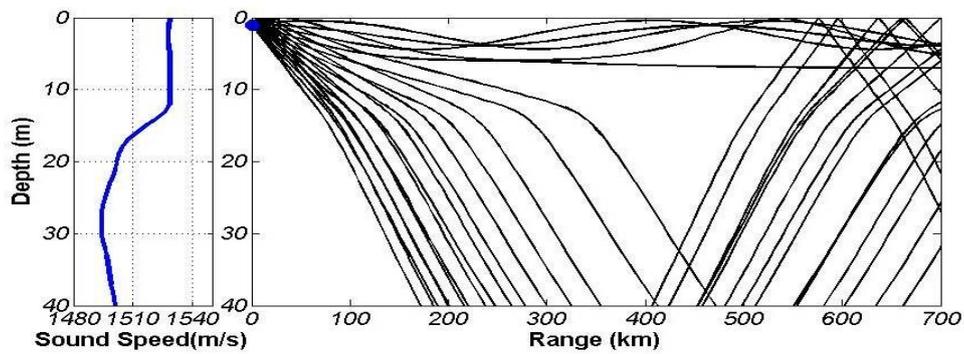


Fig. 4.24. Ray tracing for site C4 on Aug. 1, 2010. (Channel depth:8m, critical angle of ray: 2.04°)

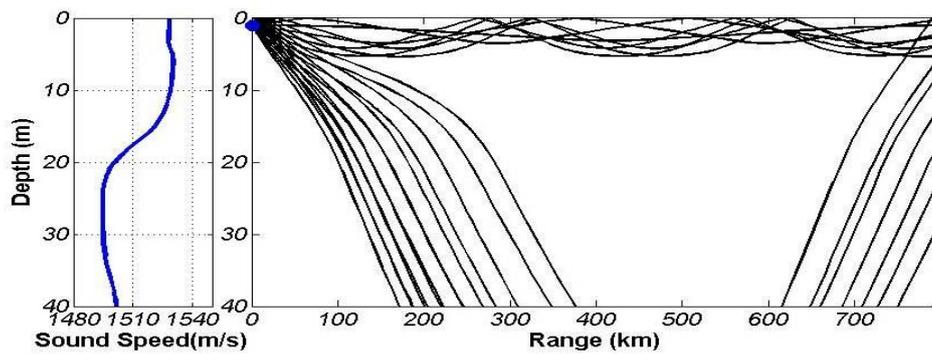


Fig. 4.25. Ray tracing for site C4 on Aug. 1, 2010. (Channel depth:6m, critical angle of ray: 3.41°)

표층채널로 인한 음파전달 변화

제 4 장에서는 표층채널이 형성되는 조건에 대해서 살펴보았다. 결국 저염분수의 낮은 염분으로 인해 표층에서 음속이 감소하여 표층채널이 형성될 수 있으나, 이는 온도수직분포 기울기와의 관계에 의해 결정된다는 사실을 확인할 수 있었다. 한편, 표층채널이 형성되면 음파에너지가 표층을 따라 전달되게 되는데 이번 장에서는 표층을 따라 전달되는 음파의 특징을 다양한 측면으로 분석해 본다.

5.1 음원의 주파수에 따른 음파전달 변화

제 3 장의 결과에 의하면 표층채널이 생성되면 음파에너지가 표층채널 안에 갇혀 전달되는데, 이러한 결론을 일반화 시키기에는 근거가 충분치 못하다. 제 3 장에서 모의 실험을 위해 이용된 음선이론은 회절이나 산란과 같은 현상을 고려하지 않으므로 음파채널에서의 에너지 유출을 반영하지 못하기 때문이다[23]. 저주파수 음파의 회절에 의한 채널에서의 에너지 유출은 음향학에서 이미 알려진 사실이다. 따라서 저염분수로 인해 채널이 형성 되었을 경우 모든 주파수의 음파가 표층채널을 따라 전달된다고 판단할 수는 없다. 따라서 본 절에서는 음원의 주파수에 따른 음파전달 변화에 대해 살펴보기로 한다.

정규모드이론에 의하면, 첫 번째 모드의 주파수가 음향 도파관의 차단 저주파수(low frequency cut-off)보다 낮은 음파들은 채널 안에 갇혀 전달될 수 없다. 간단히 말해 채널을 통과하기에 파장이 너무 큰 음파는 도파관 안에 갇혀 전달되기 힘들다는 것이다[28]. 이를 이용한 Urick 의 관계식에 의하면 채널의 수심과 그 안에 갇혀 전달되는 음파의 파장과의 관계는 다음과 같다.

$$\lambda_{\max} = (8/3)\sqrt{2} \int_0^H \sqrt{N(z) - N(H)} dz \quad (12)$$

여기서 $N(z)$ 는 수심에 따른 음파의 굴절계수이고 $N(H)$ 는 음파채널의 경계에서의 굴절계수이다. 식 (12)에서 도출되는 결과는 주파수의 급격한 차단을 의미하는 것은 아니며 생성된 채널의 두께와 음속분포 기울기에 따라 결정되는 차단 저주파수를 기준으로 저주파에서 고주파로 높아질수록 회절현상이 잘 일어나지 않아 채널 안에 갇혀 잘 전달될 수 있다는 것을 의미한다[23]. 앞서 제 3 장에서 저염분수가 발생한 환경에서의 평균 음속수직분포와 1996 년 8 월의 음속수직분포를 구한 바 있다. 이 두 음속 수직분포의 채널 경계는 각각 수심 5.1m 와 7.1m 이며, 음파굴절계수와 함께 (12)식에 적용하여 채널의 차단 저주파수를 구하면 각각 8.23kHz 와 2.54kHz 가 된다.

음원의 주파수 변화에 따른 음파전달 변화를 살펴보기 위하여 모의실험을 통하여 전달손실을 계산하였다. 음파전달 모델로는 RAM 모델을 이용하였다[27]. 제 3 장에서 살펴본 결과에 의하면 음원이 표층에 있는 경우에 음파채널이 형성되므로 음원은 수심 3m 에 두었다. 주파수는 1.5kHz, 3.0kHz, 4.5kHz 로 변경 하면서 그 변화를 살펴보았다. RAM 의 결과는 전달손실이 음의 값(-)으로 표기 되었음을 밝힌다.

먼저 저염수가 발생한 환경의 평균 음속수직분포를 이용한 결과를 살펴보면 (Fig.5.1) 음원의 주파수가 1.5kHz 인 경우 음파의 중첩으로 인해 전달 손실이 다른 수심에 비해 표층부근에서 약간 적은 결과를 보이거나 대체적으로 음파의 에너지가 수심에 고루 분산되어 있으며 표층에서 전달되는 음파를 구별해내기 는 어려워 보인다. 그러나 음원의 주파수가 3.0kHz 나 4.5kHz 의 경우 표층에서의 전달 손실이 상대적으로 작게 나타나고 있으며 그로 인해 음파가 표층을 따라 전달 되고 있다는 것을 구별해 낼 수 있다. 1996 년 8 월의 경우도 유사한 결과를 보이고 있다(Fig.5.2). 음원의 주파수가 1.5kHz 인 경우 표층에서의 전달 손실이 다른 수심에 비해 상대적으로 작게 나타나지만, 주파수가 3kHz 나 4.5kHz 의 경우에 비해 수심 약 10m 아래로 음파에너지가 많이 분산된 것을 볼 수 있는데 이는 회절 등으로 인해 음파가 채널 안에 완전히 갇히지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 반면 음원의 주파수가 3.0kHz 와 4.5kHz 인 경우는 음파가 채널 안에서 큰 손실 없이 매우 잘 전달되고 있는 것을 확인할 수 있다.

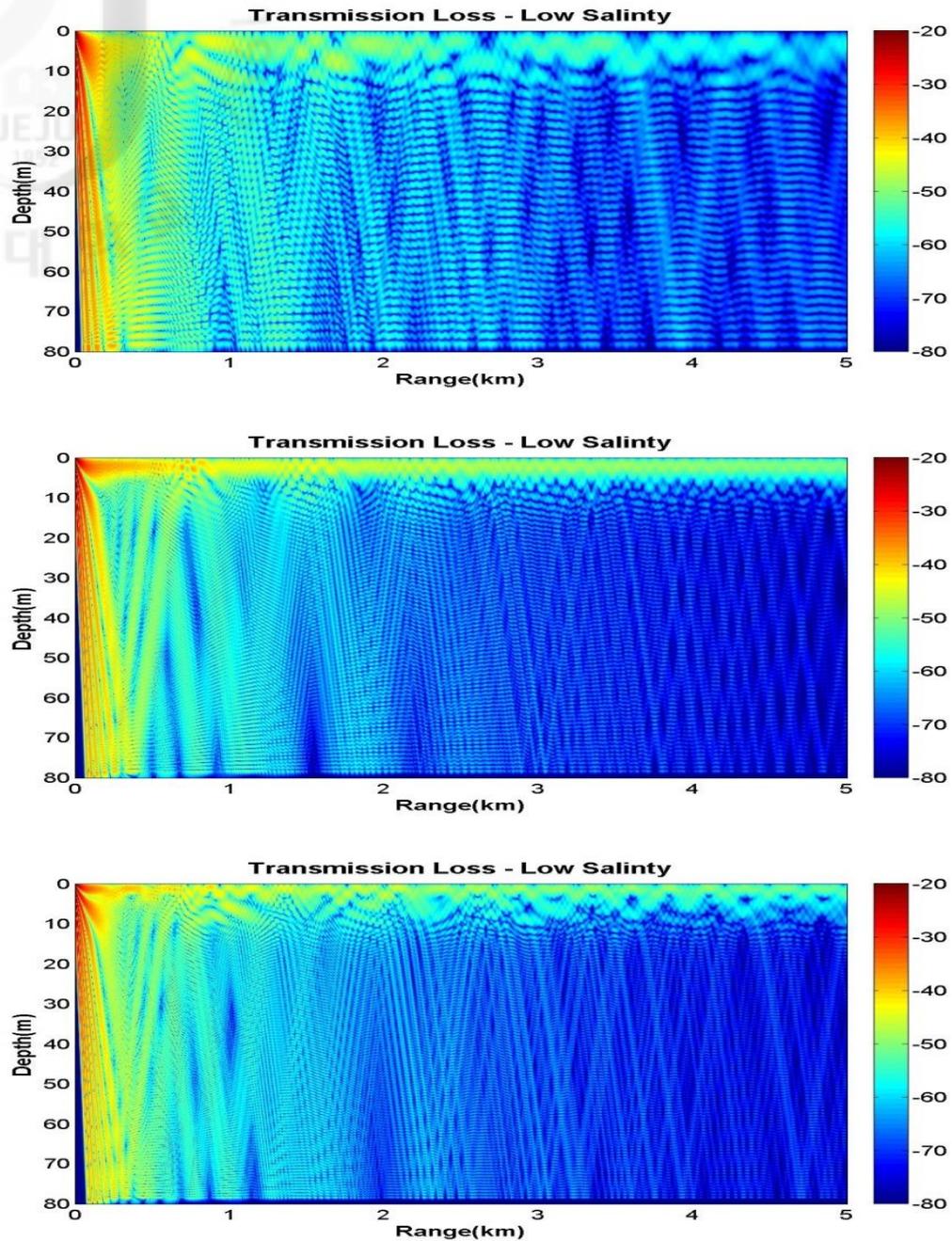


Fig. 5.1. Transmission loss with depth and range for source frequency 1.5kHz (top), 3.0kHz (middle), 4.5kHz (bottom) in mean low salinity environment

보다 정량적인 분석을 위해 거리와 수심에 따른 전달손실을 구해보기로 한다. Fig.5.3 과 Fig.5.5 는 평균 환경과 1996 년 8 월 5 일의 수심 3m 에서 거리에 따른 전달 손실을 나타내고 있다. 먼저 저염분수가 존재하는 평균 음속수직분포 환경에서의 결과를 살펴보면 (Fig.5.3) 음원의 주파수가 4.5kHz 인 경우에 비해 1.5kHz 인 경우가 전달손실이 큰 것을 확인 할 수 있다. 비교를 위해서 두 결과를 함께 나타내 보면 Fig.5.4 와 같다. 주파수가 서로 다르므로 중첩효과가 발생하는 거리가 다르게 나타나고 있으나 7.8km 에서 10km 사이의 결과를 보면 약 2~5dB 정도의 차이로 주파수가 높은 4.5kHz 의 경우가 1.5kHz 에 비해 전달손실이 낮게 나타나고 있다.

1996 년 8 월 5 일의 경우는 보다 뚜렷한 차이를 확인할 수 있다. 10km 떨어진 지점에서 음원의 주파수가 3.0kHz 인 경우는 1.5kHz 인 경우에 비해 수심 3m 에서의 전달 손실이 약 10dBd 이상 작은 값을 보인다(Fig.5.5). 음파가 해저면 반사등으로 인한 에너지 손실 없이 원통형으로 전파한다고 가정할 때의 기하학적 전파(geometric spreading)를 이론적으로 계산하여 점선으로 표시하였다[29]. 음원의 주파수가 1.5kHz (Fig.5.5(a))의 경우 전달 손실이 기하학적 전파의 전달 손실보다 매우 크게 나타나는 것에 비해 3.0kHz 또는 4.5kHz 의 경우(Fig.5.5(b),(c)) 전달 손실은 기하학적 전파로 인한 전달손실과 거의 유사한 결과를 보이고 있는데 이는 전자의 경우 경계면 반사 등으로 인한 에너지 손실이 있는 반면 후자는 음파가 전달되는 동안 에너지의 손실이 매우 적다는 것을 의미한다. 이 결과는 채널의 차단주파수를 고려 해 볼 때 음파의 파장이 채널의 두께에 비해 크지 않아 음파가 채널 안에 효과적으로 갇혔기 때문인 것으로 판단된다.

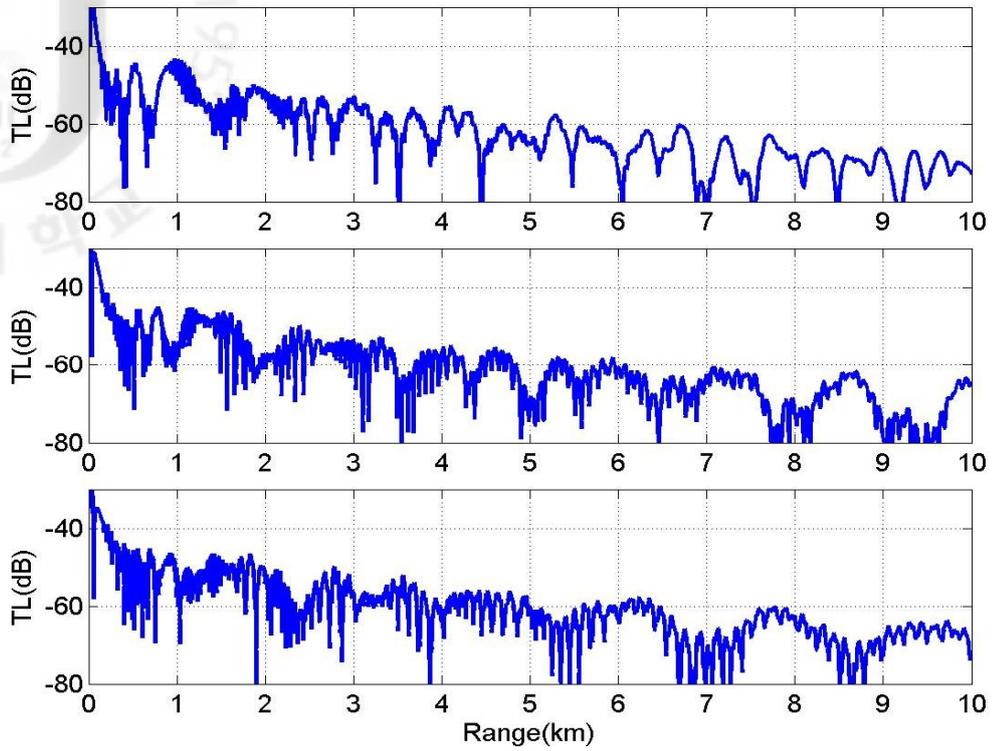


Fig. 5.3. Transmission loss with range at 3m depth in mean low salinity environment (top): 1.5kHz, (middle): 3.0kHz, (bottom): 4.5kHz

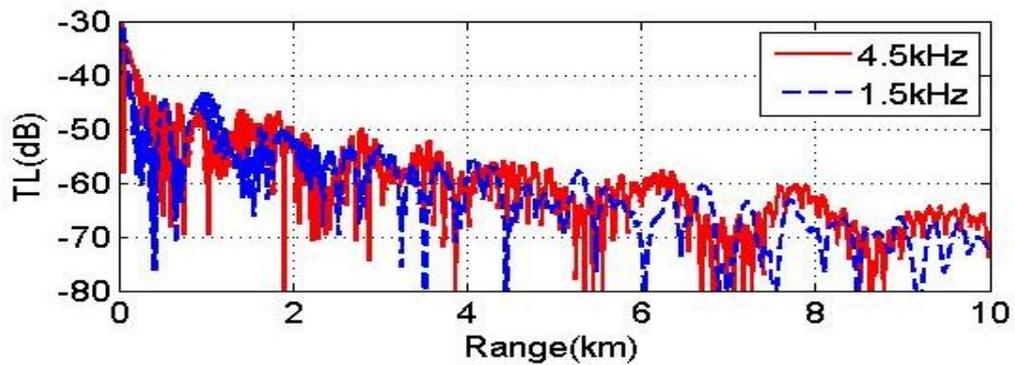


Fig. 5.4. Comparison of transmission loss with 1.5kHz and 4.5kHz of source frequency.

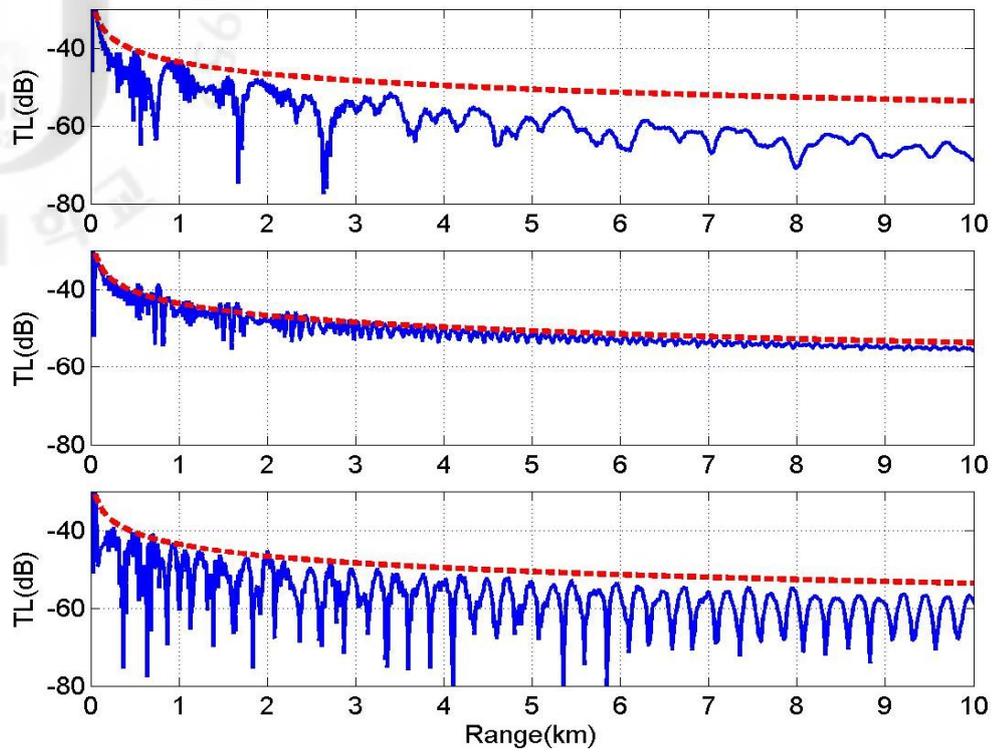


Fig. 5.5. Transmission loss with range at 3m depth on Aug. 5th, 1996 (top): 1.5kHz, (middle): 3.0kHz, (bottom): 4.5kHz, with geometric spreading loss(dashed lines)

다음은 음원으로부터 6km 떨어진 지점과 8km 떨어진 지점에서의 수심에 따른 전달손실을 나타낸다(Fig.5.6~Fig.5.9). 먼저 저염분수가 존재하는 환경의 평균음속 수직분포를 이용한 결과를 살펴보면, 6km 지점에서 수심 3m 지점의 결과를 비교해 볼 때 4.5kHz 인 경우가 1.5kHz 의 경우에 비해 전달 손실이 다소 적은 결과를 보이거나 수심 약 10m 이내의 표층 전체로 볼 때는 주파수에 따른 변화가 큰 차이를 보이지는 않는다. 8km 지점에서는 6km 의 결과에 비해 20m 이상의 수심에서 다른 수심에 비해 비교적 전달손실이 작게 나타나지만 이 경우 계산된 표층 채널의 수심이 약 5m 이므로 표층채널의 영향으로 보기는 어려우며 주파수에 따른 변화도 크지 않다. 그러나 1996 년 8 월의 경우는 거리와 주파수에 따라 전달손실의 변화를 확실히 비교할 수 있다. Fig.5.8 을 보면 음원의 주파수가 1.5kHz 의 경우 전달손실은 모든 수심에서 비슷한 수치를 보이고 있으나 주파수가 3.0kHz 인 경우 표층에서의 전달손실이 다른 수심에 비해 매우 낮은 수치를 보이고 있다. 4.5kHz 의 경우도 마찬가지이며 이때의 표층채널 수심이 약 7m 인 점으로 미루어 보아 Fig.5.7 의 결과는 표층채널의 영향인 것으로 추정된다. 또한 거리가 주파수가 4.5kHz 인 경우를 볼 때 6km 의 경우와 8km 의 경우를 비교해 보면 2km 더 전파 되는 동안 표층채널 아래로 전달된 음파들은 많이 소멸 되었으나 표층에서는 큰 전달손실 증가 없이 잘 전달 된 것을 확인할 수 있다.

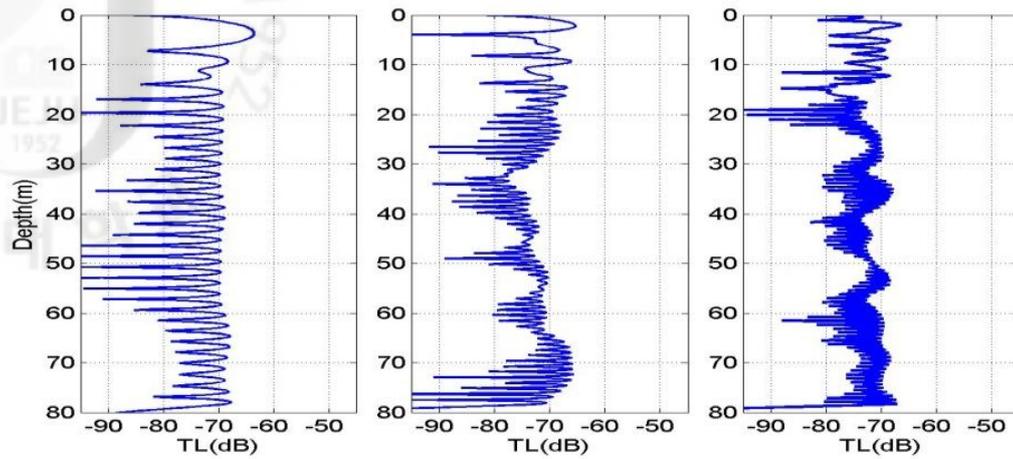


Fig. 5.6. Transmission loss with depth at range of 6 km from a source for mean low salinity environment. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz

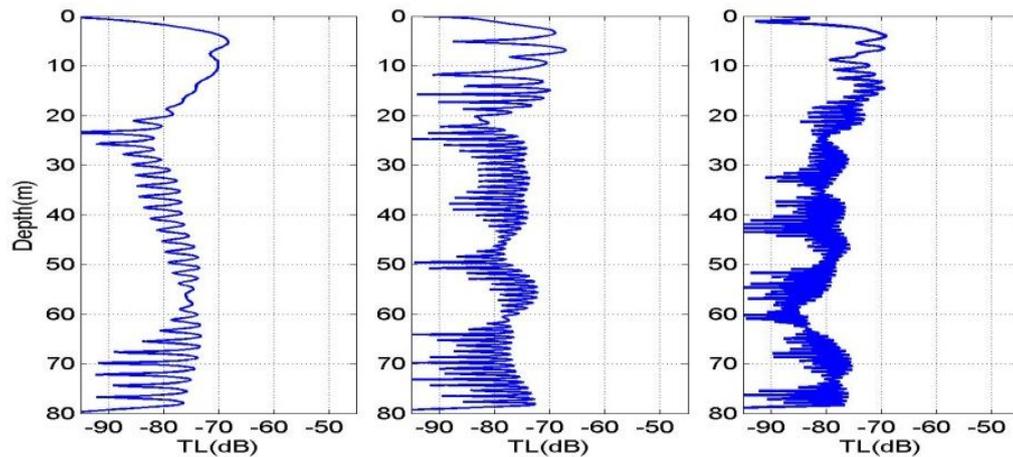


Fig. 5.7. Transmission loss with depth at range of 8 km from a source for mean low salinity environment. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz

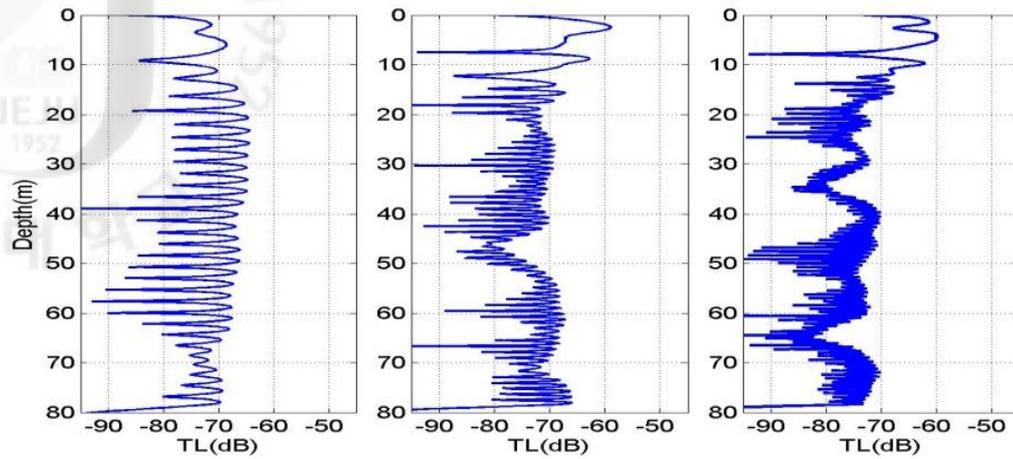


Fig. 5.8. Transmission loss with depth at range of 6 km from a source for case of 1996. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz

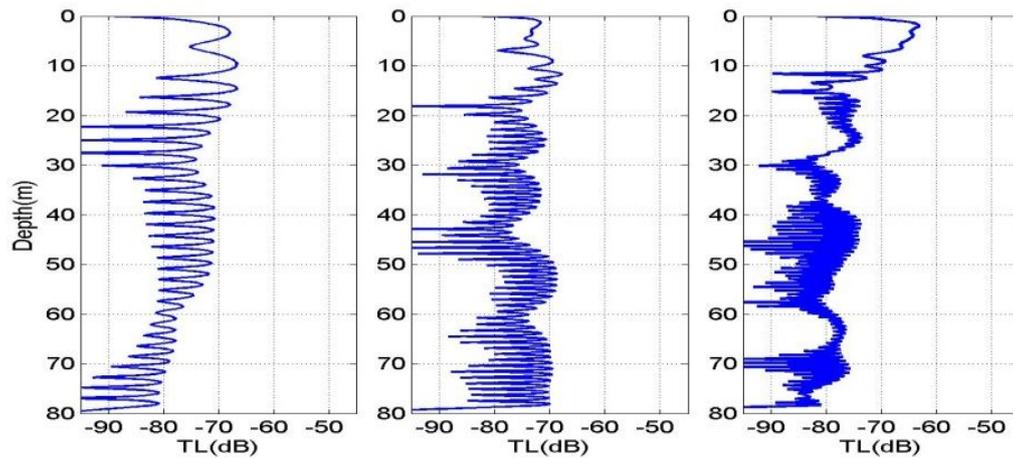


Fig. 5.9. Transmission loss with depth at range of 8 km from a source for case of 1996. Frequencies are (left) 1.5 kHz, (middle) 3.0 kHz and (right) 4.5 kHz

위의 결과들을 종합하여 표층에서의 주파수에 따른 전달손실을 계산하였다(Fig.5.10~Fig.5.12). 주파수는 1.5kHz 부터 5kHz 까지 500Hz 간격으로 계산 하였으며 10m 이내의 수심 중 가장 낮은 전달 손실을 보이는 값에서 상하 앞뒤 5 격자 값을 평균하여 사용하였다. 수신기의 거리가 6, 12, 18km 일 때의 전달손실 값을 각각 계산하여 함께 나타내었다. 시뮬레이션 모델의 경우 정확한 수치 해석을 위해서 고주파수로 갈수록 더 조밀한 격자 간격을 필요로 하므로 전산상 큰 계산 량이 요구된다. 이 경우 8kHz 이상의 주파수 범위는 매우 큰 계산 량이 요구되어 격자 간격을 더 줄일 수 없었으므로 8kHz 이상의 결과 값은 신뢰할 수 없다고 판단하여 나타내지 않았다.

결과를 분석해 보면 다음과 같다. 저염분수가 존재하는 환경의 평균 음속 수직분포의 경우 채널의 차단 저주파수는 8.23kHz 인데 8kHz 로 주파수가 증가할수록 전달손실이 감소하는 결과를 보이고 있으며 18km 에서의 결과가 이를 잘 나타내주고 있다(Fig.5.10). 1996 년의 결과는 더욱 확실한 결과를 볼 수 있다. 1996 년 8 월 5 일의 수직분포의 경우 채널의 차단 저주파수는 2.54kHz 이다. 차단 주파수 이하의 주파수는 전달손실이 크며 그 이상의 주파수가 표층에서 매우 효과적으로 전달되고 있는 것을 확인할 수 있다. 표층채널이 비교적 약하게 생성된 평균 음속수직분포에 비해 거리에 따른 전달 손실 증가(6km, 12km, 18km)도 매우 작게 나타났다(Fig.5.11).

그러나 일반적으로 해양환경에서는 주파수가 증가할수록 감쇠손실이 커진다. RAM 모델의 경우 주파수에 따른 전달손실을 반영하지 못하기 때문에 Fig.5.10 의 전달손실 결과는 수정될 필요가 있다.

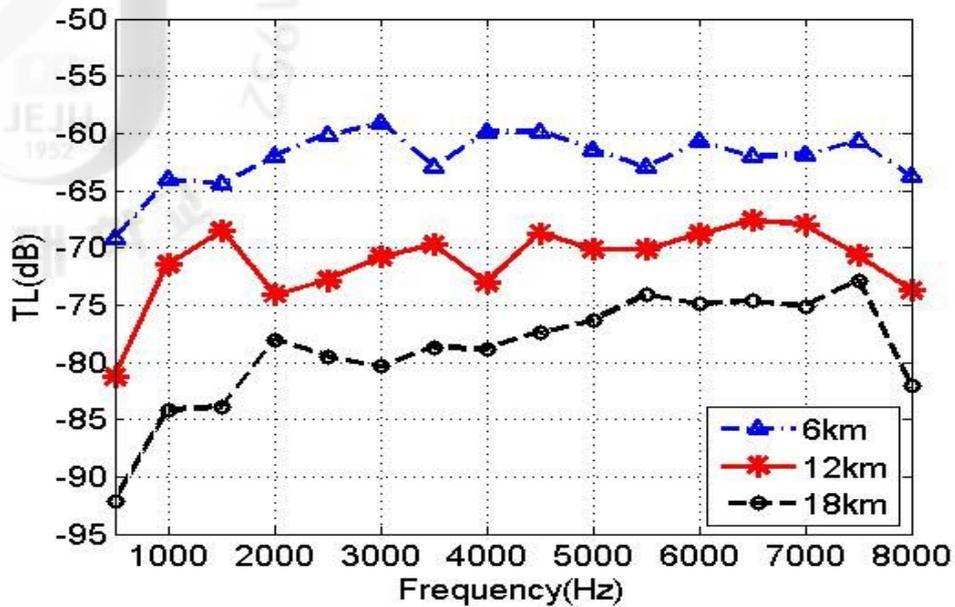


Fig. 5.10. Transmission loss versus frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle), 12km (star) and 18km(circle) from a source for mean low salinity environment.

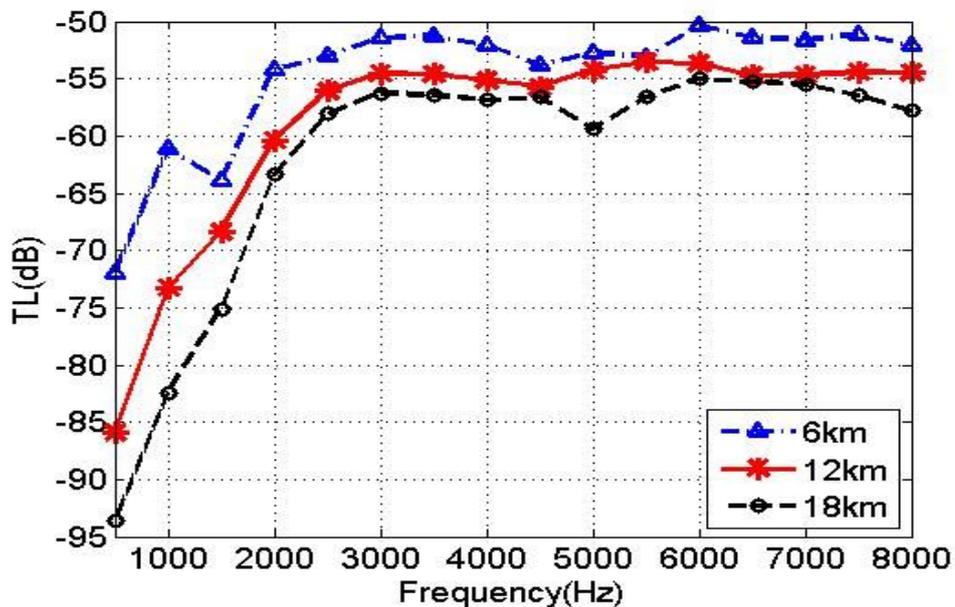


Fig. 5.11. Transmission loss versus frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle), 12km (star) and 18km(circle) from a source for case of 1996.

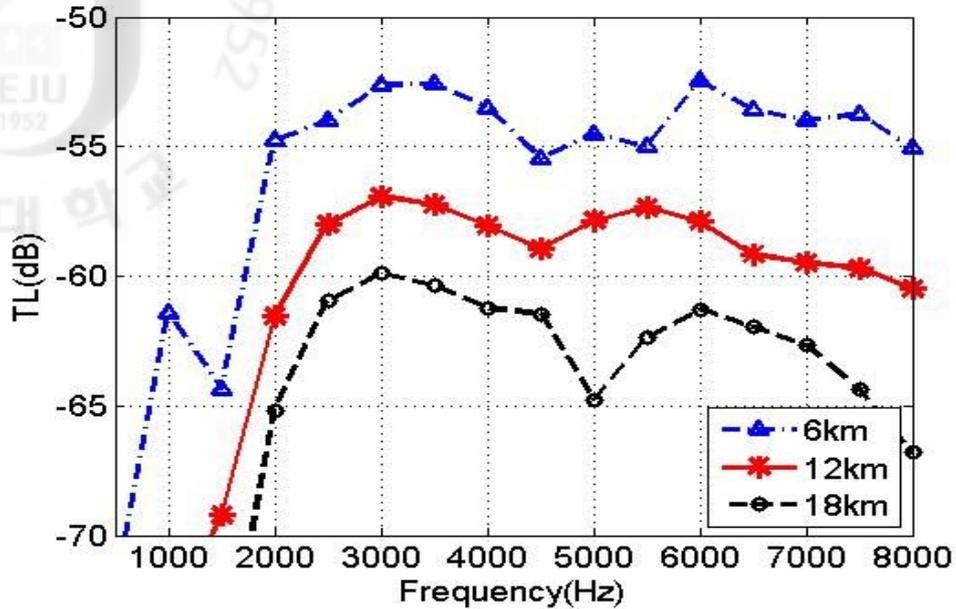


Fig. 5.12. Revised transmission loss in terms of attenuation coefficient versus source frequency in surface sound channel at range of 6km (triangle), 12km (star) and 18km(circle) from a source.

이를 위해 다음의 수식을 적용하여 결과를 수정하였고 이를 Fig.5.12.에 -70 ~ -50dB 로 확대하여 나타내었다.

$$TL = 10 \log(rr_0) + \alpha r \quad (r > r_0) \quad (13)$$

$$\text{where } r_0 = H / (2 \tan(\beta_0))$$

여기서 α 는 주파수에 따른 감쇠계수(dB/km), β_0 는 최대 지표각, H 는 수심 그리고 r 은 거리를 나타낸다. 위의 수식을 적용하여 결과를 수정하면 Fig.5.12 의 결과를 얻을 수 있다. 이 결과에 의하면 주파수가 3.0kHz 인 경우 차단 주파수에 의해 전달손실이 최소가 되며 그 이상의 주파수는 감쇠계수의 영향으로 전달손실이 증가하게 된다.

5.2 염분의 공간변화에 따른 음파전달 변화

5.2.1 자료수집 및 음속수직분포

제 2 장에서 언급 했듯이 저염분수는 수괴를 형성하여 이동하기도 하는데, 이로 인해 해당 해역에서는 염분이 다양한 공간적 분포를 이룬다. Fig.2.4 에 나타난 염분분포를 살펴보면 동중국해가 위치해 있는 남서방향에서 북동방향으로 저염분 수괴가 밀려오고 있는 모습을 볼 수 있으며 염분이 가장 낮은 D5 정점에서의 표층염도는 23.50psu 이다. 본 절에서는 이렇게 저염분수가 공간적 분포를 이루는 환경에서의 음파전달 변화는 어떠한지에 대해 살펴보았다.

획득된 수온과 염분 자료 중에서 저염분 수괴의 중심으로부터 멀어지는 방향인 D4 에서부터 B4 까지의 자료를 이용하여 모의 실험을 해 보았다. 먼저 각 정점의 음속수직분포를 계산한 결과 B4 를 제외한 C4 와 D4 에서 표층의 낮은 염도로 인해 표층 부근의 음속수직분포가 양의 기울기를 갖는 것을 확인하였다. D4, C4, B4 정점에서의 음속수직분포 및 해저 지형을 Fig.5.13 에 나타내었다. 해저면의 수심은 각각 99m, 71m, 76m이며 정점 사이의 거리는 각각 약 10km 와 9km 이다. 음속수직분포를 볼 때 D4 정점에서는 표층에서 얕지만 강한 채널이 형성될 것으로 예상되며 C4 정점에서는 기울기가 작지만 비교적 두터운 채널이 형성될 것으로 예상된다. 그리고 B4 정점의 경우 채널이 형성되지 않을 것으로 예상할 수 있다.

5.2.2 거리 종속환경에서의 음파전달 변화

저염분수의 염분이 수온과 함께 공간적인 분포를 갖는 환경에서(Fig.5.5) 음파전달 변화를 살펴보기 위해 타원방정식(PE)기반의 거리종속 음파전달모델인 RAM(Range-dependent Acoustic Model)을 이용하여 모의실험을 실시하였다[27].

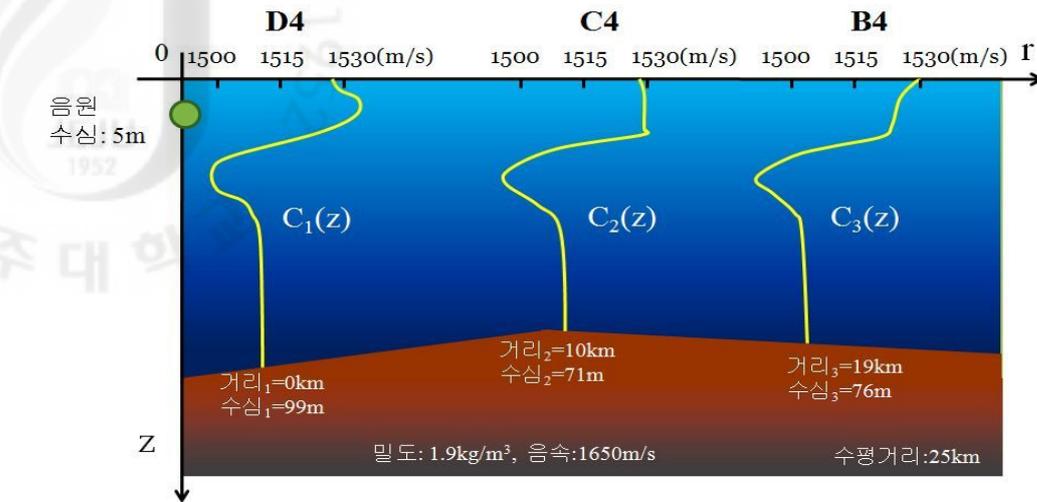


Fig. 5.13. Diagram of ocean sea-bed and SSPs (sound speed profiles) for D4(left), middle(C4) and B4(right).

저염분수괴 내부에서 밖으로 전달되는 상황을 모의하기 위해 음원이 D4 정점에 있고 음파가 B4 정점을 향하여 전파되는 경우를 고려하였으며, 그와 반대로 음파가 저염분수괴 외부에서 안으로 전달되는 상황을 모의하기 위해 음원이 B4 정점에 있고 D4 정점을 향하여 전파되는 경우를 비교해 보기로 한다(Fig.2.4).

식(12)에 의하면 D4 정점에서 생성될 수 있는 표층채널에서의 차단 저주파수는 약 5kHz 이나 예비 모의실험 결과 약 4kHz 부터 표층채널이 형성되는 것이 확인되어 음원의 주파수를 4kHz 로 설정하였다.

먼저 저염분수 내부에서 외부로 전달되는 현상을 보면, 음원이 위치하는 D4 해역에 저염분수로 인해 표층채널이 형성되었고, 이로 인해 음파가 표층을 따라 C4 정점까지 큰 손실 없이 전달되고 있다(Fig.5.14). 표층채널을 통과하지 못한 음파는 해저면 반사등으로 인해 많은 전달손실이 있는 것을 대조적으로 볼 수 있다. 한편, C4 정점의 음속기울기는 D4 정점에 비해 작으나 표층채널수심은 약 15m 까지 확대된다. 따라서 음파가 C4 정점 이전에 수심 약 5m 이내에서 전달되던 음파가 C4 정점을 지나면서 약 15m 부근까지 확산되는 것을 볼 수 있다. Fig.5.14 를 보면 D4 에서부터 표층채널을 타고 전달된 음파 중 일부는

해저면으로 굴절되나 대부분은 그대로 C4 해역의 표층채널로 이어져 전파되고 있다. B4 정점의 경우 표층음속수직분포를 볼 때 표층채널이 형성되지 않았는데 (Fig.5.13), 음파전달 모의실험 결과 표층채널을 통해 C4 정점을 지나 전달된 음파는 B4 해역에 이르러 해저면으로 모두 굴절되게 되게 된다. 그 후 음파는 이내 해저면 반사손실 등으로 에너지를 모두 잃게 된다. 보다 정량적인 분석을 위해 표층 5m 에서 거리에 따른 전달손실을 살펴보면(Fig.5.15) B4 정점이 위치한 19km 이후로 전달손실이 크게 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 수심에 따른 전달손실을 분석해본 결과(Fig.5.16) C4 와 B4 정점 사이인 16km 까지 대부분의 에너지가 표층에 존재했던 반면 B4 정점 이후인 24km 지점에서는 표층에서의 에너지가 감소하여 전 수심으로 분산된 것을 볼 수 있다.

반대로 저염분수 외부에서 내부로 음파가 전달되는 현상을 살펴보면 다음과 같다(Fig.5.17~Fig.5.19). 먼저 B4 해역에서는 음속 수직분포에 의해 음파가 해수면 방향으로 굴절되면서 해저면 반사등을 통해 거리에 따라 에너지가 크게 감소하며(Fig.5.18) 전 수심에 고루 분포된다 (Fig.5.19). 그러다 C4 정점을 지나면서 음파는 두 층으로 나뉘어 전달 되는데 표층채널에 존재하는 부분으로 전달 된 음파는 표층채널 안에 갇혀서 전달 되고 표층채널 아래로 전달 된 음파는 해저면 반사등을 통해 계속해서 손실된다. C4 정점에서부터 표층채널을 통해 전달 되어 온 음파는 D4 정점을 지나면서 마찬가지로 일부는 표층채널을 통해 계속 전달 되고 일부는 해저면으로 굴절된다. 결과적으로 24km 떨어진 곳에서는 음파의 수심에 따른 전달손실이 전반적으로 100dB 이상 되지만 표층을 통해 전달된 음파로 인해 표층에서의 손실이 10dB 이상 더 작은 결과를 볼 수 있다(Fig.5.19).

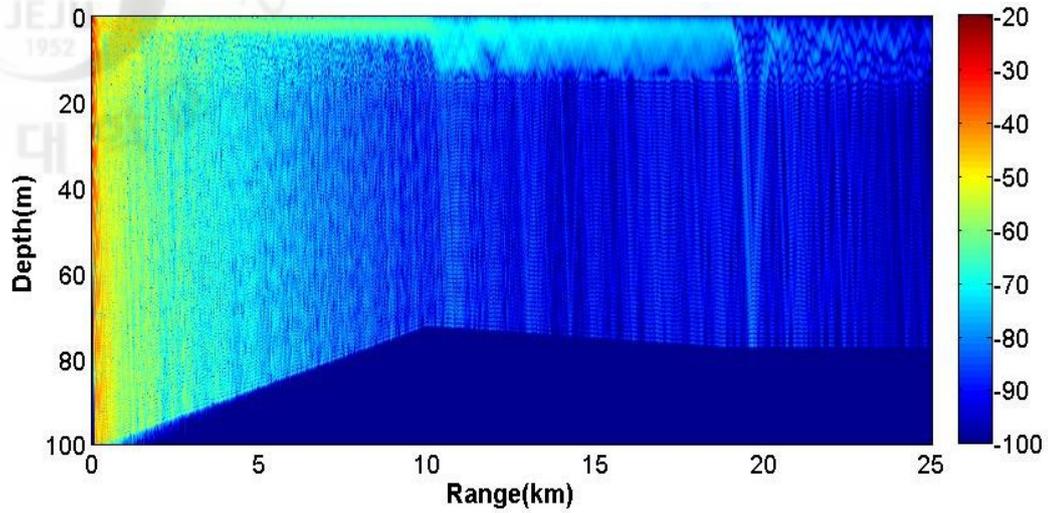


Fig. 5.14. Transmission loss for range dependent environment. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4. The sound energy is propagated through the surface channel.

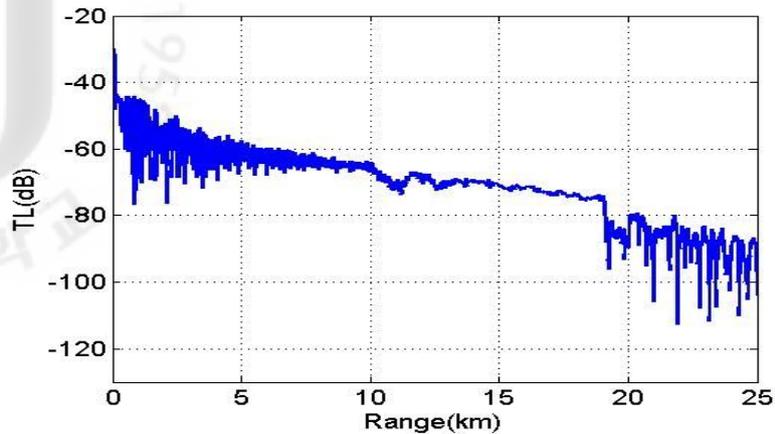


Fig. 5.15. TL(Transmission Loss) with range at 5m depth. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4. There is a drastic increase of TL at 19km where the surface sound channel is disappeared due to change of sound speed profile.

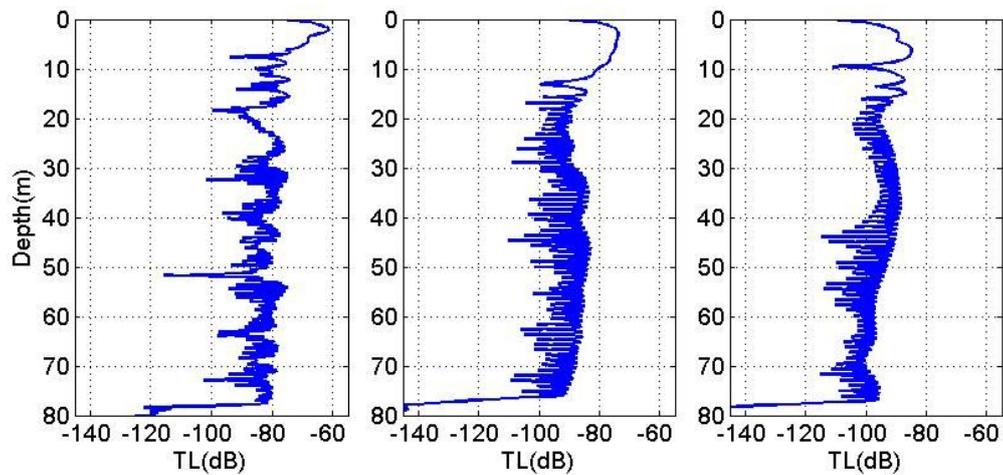


Fig. 5.16. TL(Transmission Loss) with depth at (a) 8km, (b) 16km and (c) 24km. Source is located in D4 at 5m depth and the sound is propagated toward B4.

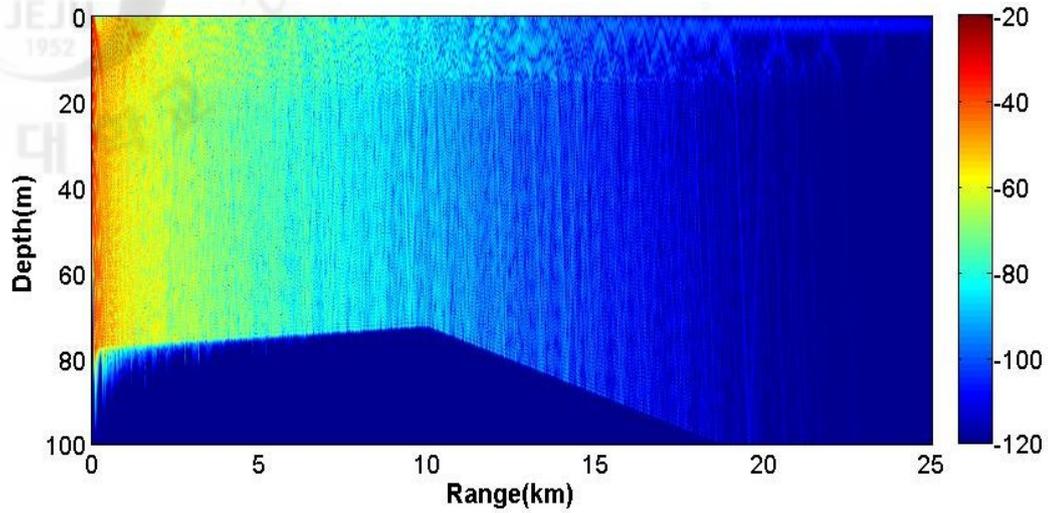


Fig. 5.17. TL (Transmission Loss) for range dependent environment. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.

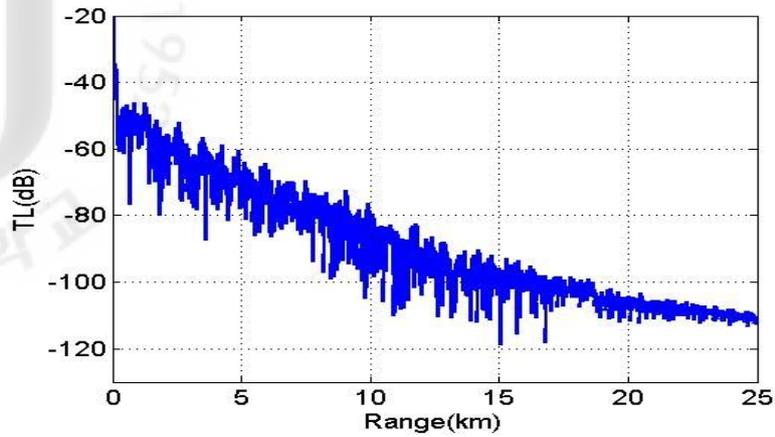


Fig. 5.18. TL(Transmission Loss) with range at 5m depth. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.

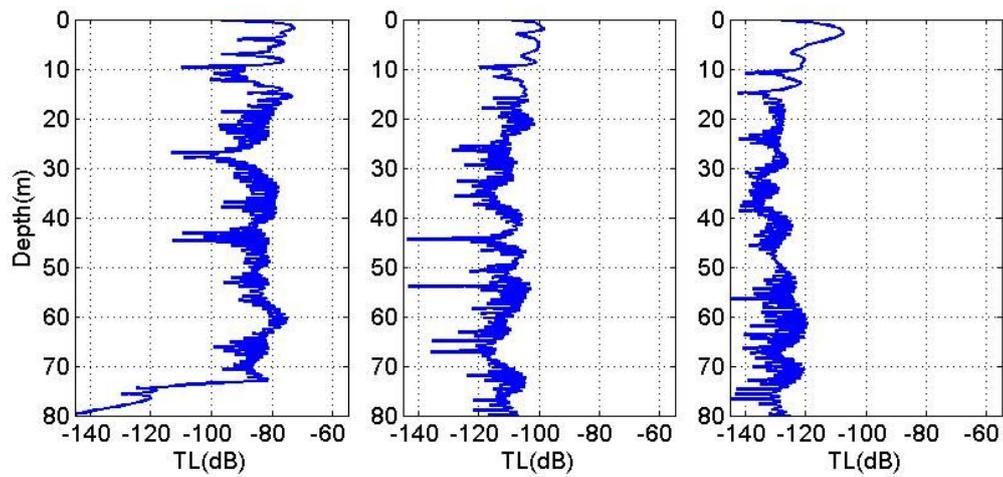


Fig. 5.19. TL(Transmission Loss) with depth at (a) 8km, (b) 16km and (c) 24km. Source is located in B4 at 5m depth and the sound is propagated toward D4.

5.3 저염분수 환경에서 음파전달의 일변화

해양의 물리적인 특성은 하루 동안에도 다양한 요인에 의해 변한다. 그 중에서도 수온은 태양열과 해류 또는 조류로 인해 비교적 큰 일변화를 보이며 음파전달경로에도 큰 영향을 미친다. 소나 운용의 측면에서 오후효과(Afternoon effect)는 잘 알려진 현상이다. 이는 기온의 일교차로 인해 해양의 수온수직분포에 변화가 생기게 되고, 이로 인해 음파전달 경로가 변화하게 되어 소나 탐지 성능이 크게 달라지는 현상을 말한다.

앞의 2 장과 3 장에서 저염분수로 인해 음속이 변하게 되며 이는 음파전달 변화를 야기 한다는 결과를 확인하였는데, 이점에서 저염분수로 인한 음파전달 변화는 수온에 의한 음파전달 변화에 비해 어떠한지 또는 저염분수가 존재하는 환경에서 수온에 의한 음파전달 변화는 어떠한지에 대해 의문을 가져 볼 수 있다. 따라서 본 절에서는 시간에 따라 측정된 수온 및 염분자료를 이용하여 음파전달의 일변화를 살펴본다. 이를 위해 다음의 항목을 비교 및 분석해 보기로 한다.

1. 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화와 저염분수 발생으로 인한 음파전달변화
2. 저염분수가 존재하는 환경과 존재하지 않는 환경에서 수온의 일변화로 인한 음파전달 변화

위의 항목을 조사하기 위해 먼저 수심에 따른 수온과 염분의 일변화를 분석해 보고 저염분수 환경을 고려하여 모의 실험에 적용해본다. 그리고 앞서 언급한 항목에 대하여 음파전달 변화를 음파전달경로와 전달손실 측면에서 분석해 보기로 한다.

3.2.1 제주 남부 해역에서 음속의 일변화

해양 환경의 일변화를 조사하기 위해 지난 2009 년 7 월 27 일부터 28 일 사이 제주 남부해역의 두 정점에서 수온 및 염분의 일변화를 26 시간 동안 1 시간 간격으로 측정하였다(Fig.2.5). 획득된 자료를 이용하여 음속수직분포를 구하였으며 수온 및 염분 수직분포와 함께 나타내었다(Fig.5.20). 정점 A 에서는 약 10m 까지 혼합층이 존재하며 약 10m 에서부터 약 25m 까지 수온과 염분이 크게 변하는 수온약층과 염분약층을 각각 형성하고 있다(Fig.5.20(a),(c)). 한편, 정점 B 에서의 혼합층 두께는 정점 A 보다 작으나 수온 및 염분약층에서 수온 및 염분 변화는 더 크다(Fig.5.20(b),(d)). 위의 자료들을 이용하여 각 정점에서의 음속분포를 구하면 Fig. 5.21 과 같다.

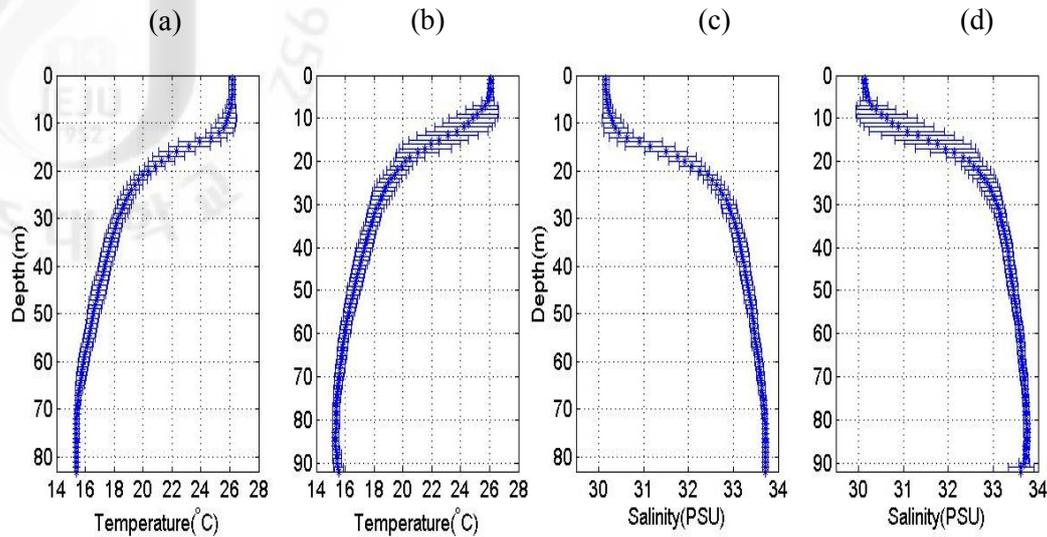


Fig. 5.20. Diurnal variation of temperature and salinity profiles with average and standard deviation values (errorbars). (a) site A(AM10 Jul 27th to AM11 28th 2009), (b) site B(PM01 Jul 27th to PM02 28th 2009), respectively

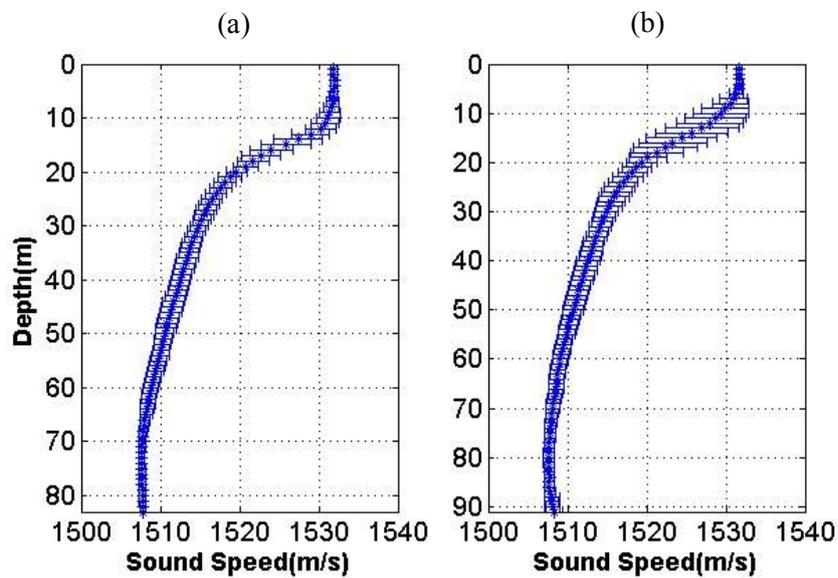


Fig. 5.21. Diurnal variation of SSP with average and standard deviation values(error bars). (a) site A(AM10 Jul 27th to AM11 28th 2009), (b) site B(PM01 Jul 27th to PM02 28th 2009).

3.2.2 제주 남부 해역에서 음파전달의 일변화

수집된 자료에 따르면 관측해역은 저염분수가 발생하지 않은 환경이므로, 비교를 위해 저염분수 환경을 모의하였다. 기존 연구에 의하면 여름철 제주 서부해역의 물리적인 일변화는 주로 수온약층에서 가장 크고 혼합층에서는 상대적으로 그 변화가 작다. 또한 저염분수는 주로 표층에 존재하며 약 20psu 에서 30psu 사이의 값을 갖는다[13-16]. 이 점을 이용하여 표층염분이 26.5psu 인 가상의 저염분수를 생성하여 결과를 비교하였다(Fig.5.22(b),(d)).

음속은 수온약층 부근에서 가장 크게 변하므로(Fig.5.21), 음속의 일변화는 수온약층에서 음속이 가장 큰 시간과 가장 작은 시간으로 대표하였다. 그 결과 정점 A 에서 음속이 가장 낮았던 시간은 오전 11 시, 가장 높았던 시간은 밤 10 시이며 정점 B 에서 음속이 가장 낮았던 시간은 오전 3 시, 가장 높았던 시간은 오후 8 시로 각각 나타났다. 해당 시각의 수온과 염분수직분포를 Fig.5.22 에 나타내었다. 또한 각각의 수온 및 염분 수직분포를 이용하여 음속수직분포를 계산하였다(Fig.5.23). 저염분수가 발생했다고 가정한 경우 표층 음속이 크게 감소되어 정점 B 의 12 시 경우를 제외하면, 표층에서의 음속수직분포가 양의 기울기를 갖는다.

Fig.5.23 의 음속수직분포를 이용하여 음파전달 모의실험을 실시하였다. RAM 을 이용하였으며[27], 식 12 에 의한 정점 A 의 차단 저주파수가 2.4kHz 인 것을 감안하여 음원의 주파수를 2.5kHz 로 설정하였다. 또한 저염분수로 인한 음속변화는 주로 혼합층에서, 일변화로 인한 음속변화는 주로 수온약층 부근에서 발생하므로 음원의 수심을 5m 와 20m 로 두어 각각 모의실험을 하였다.

먼저 정점 A 에서 음원의 수심이 5m 일 때, 일반적인 환경에서의 음파전달 일변화와 저염분수 환경에서의 음파전달의 일변화를 Fig.5.24 에 나타내었다. 저염분수가 없는 일반적인 환경에서 수온약층의 음속이 최저인 오전 11 시는 Fig.5.24 (a), 최고로 변한 오후 10 시는 Fig.5.24 (b) 이며 저염분수 환경에서 수온약층의 음속이 최저일 때는 Fig. 5.24 (c), 최고로 변한 경우는 Fig.5.24 (d) 이다. 또한 음원의 수심이 20m 일 때의 결과가 동일한 순서로 Fig.5.25 에 나타나 있다. 마찬가지로 방법으로 정점 B 의 환경에서 모의실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig.3.26 과 Fig. 3.27 에 나타내었다.

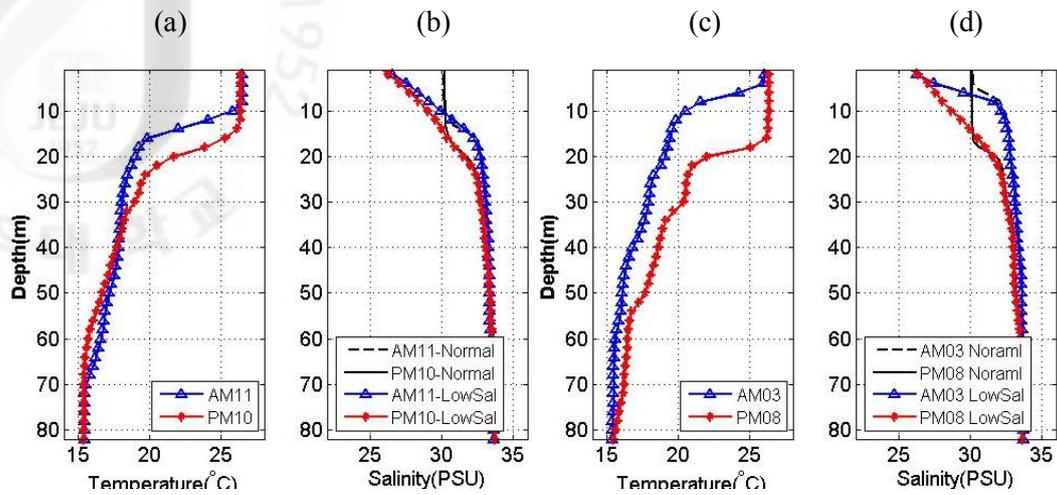


Fig. 5.22. Maximum and minimum profiles of two sites. (a) measured temperature profiles at site A (Min.: triangle, 11 am with Max.: star, 10 pm) (b) measured normal salinity profiles (Min.: dashed, Max.: solid) and assumed low salinity profiles (Min.: star, Max.: triangle) at site A, (c) measured temperature profiles at site B (Min.: triangle, 03 am with Max.: star, 08 pm), (d) measured normal salinity profiles (Min.: dashed, Max.: solid) and assumed low salinity profiles (Min.: star, Max.: triangle).

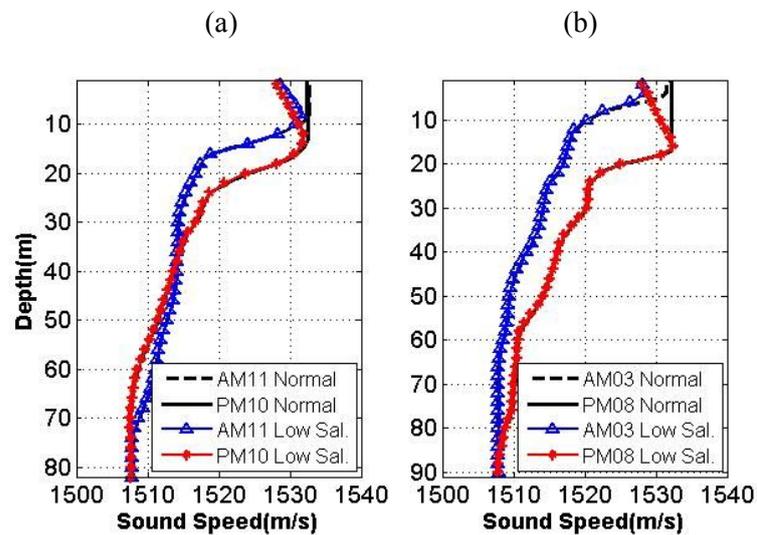


Fig. 5.23. Maximum and minimum SSPs at two sites. (a) Max. and Min. SSPs at site A with low salinity effect, (b) Max. and Min. SSPs at site B with low salinity effect

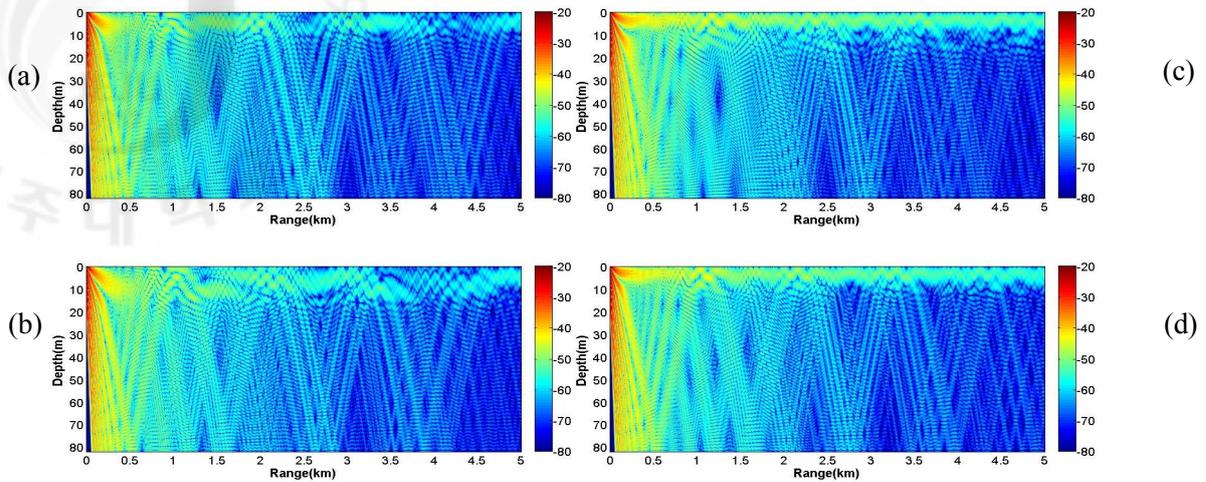


Fig. 5.24. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site A(2009.7.27-28) where source depth is 5m. Minimum (a) and maximum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Min. (c) and Max. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment.

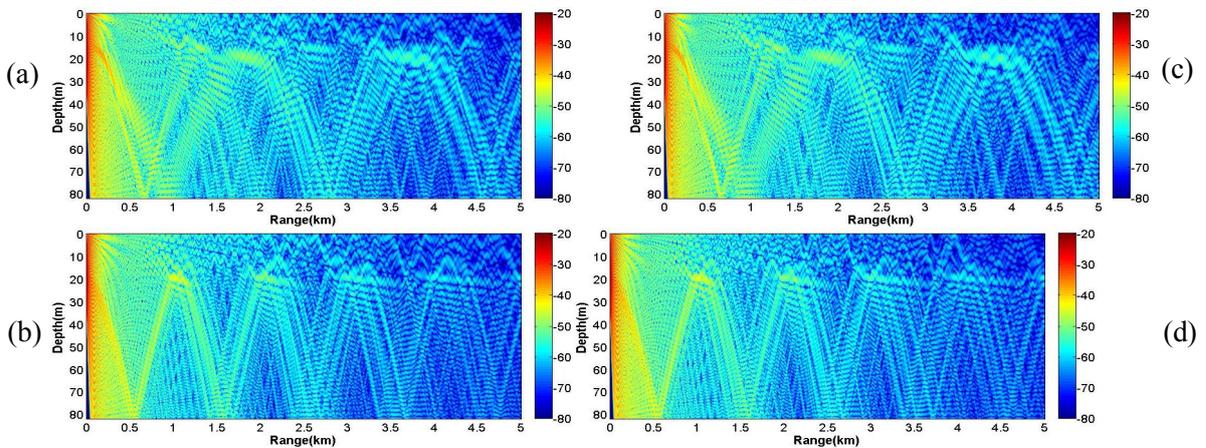


Fig. 5.25. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site A(2009.7.27-28) where source depth is 20m. Minimum (a) and maximum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Min. (c) and Max. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment.

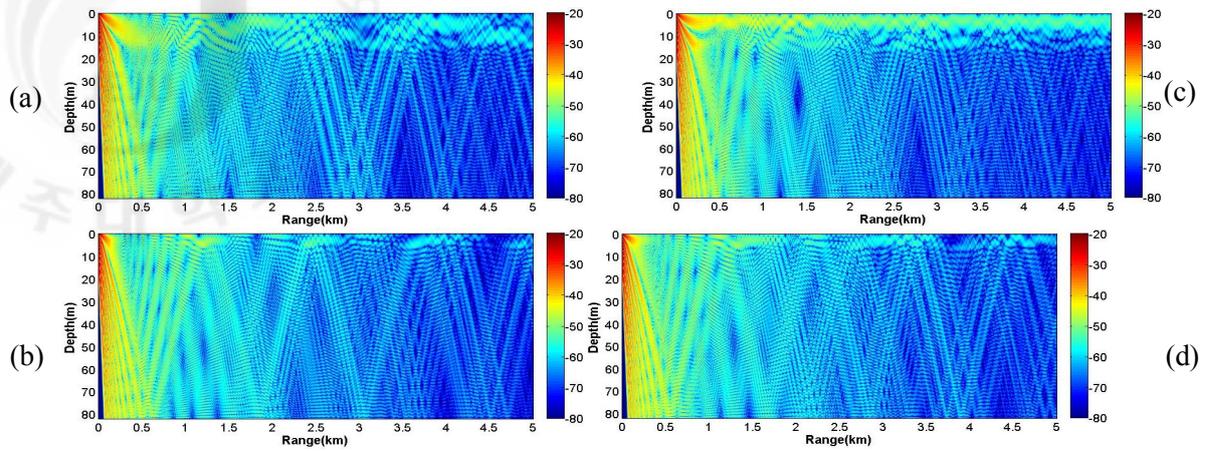


Fig. 5.26. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site B(2009.7.27-28) where source depth is 5m. Maximum (a) and minimum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Max. (c) and Min. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment.

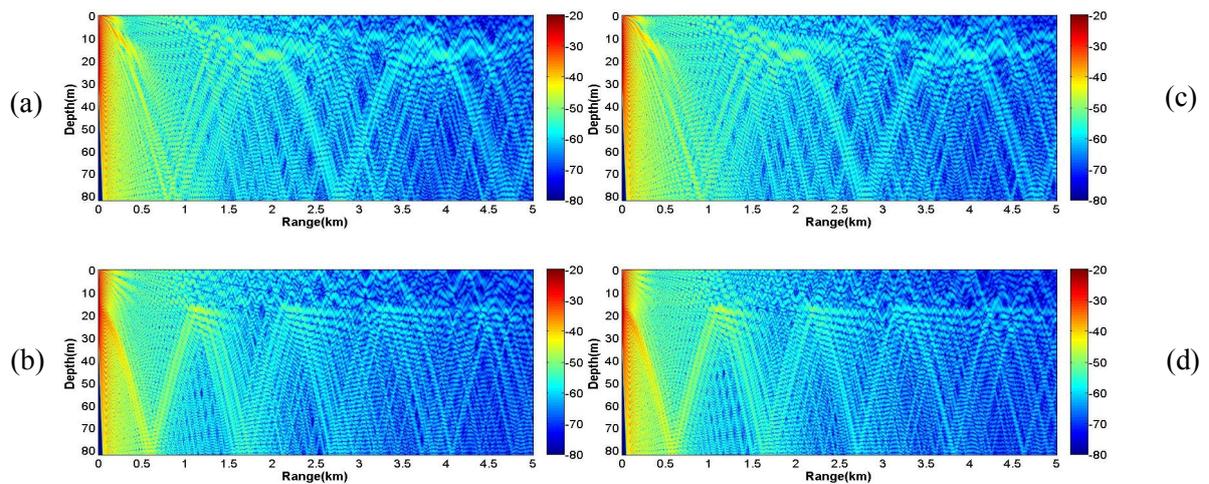


Fig. 5.27. Diurnal variation of TL(Transmission Loss) in site B(2009.7.27-28) where source depth is 20m. Maximum (a) and minimum temperature (b) at thermocline with normal salinity. The same temperature profile (Max. (c) and Min. (d) at thermocline) with assumed low salinity environment.

3.2.2.1 수온의 일변화에 의한 음파전달변화와 저염분수 발생으로 인한 음파전달변화 비교

위의 각 결과들을 서로 비교하면서 결과를 살펴 보기로 한다(Fig.5.23 ~ Fig.5.27). 어떤 결과들은 전달손실 결과만으로도 뚜렷한 변화를 보이기도 한다. 그러나 위의 결과만으로는 환경 변화에 따른 음파전달 변화의 특징을 구체적이고 정량적으로 파악하는 데는 어려움이 있다. 따라서 각 전달손실의 차이를 통해 그 변화량을 분석해 보기로 한다. 그 과정은 다음과 같다.

먼저 각 상황에 따른 일변화 양을 살펴보기 위해 전달손실로 계산된 음장의 차를 구한다(Fig.5.28, Fig.5.29, Fig.5.31, Fig.5.32). 이를 이용하면 기준되는 음장으로부터 변화된 후의 음장이 전달손실 측면에서 얼마만큼 변화했는지 모든 공간에 대해 알 수 있다. 그런 다음 그 음장의 전달손실 차를 거리에 따라 평균하여 수심에 따른 평균 전달손실 차이를 구한다(Fig.5.30, Fig.5.33).

먼저 음원의 수심이 5m 인 경우 정점 A에서 오전 11 시의 해양환경을 기준으로 하여 오후 10 시의 환경으로 변한 상황을 가정하면 그 변화량은 Fig. 5.28 과 같으며 오전 11 시의 환경에서 저염분수가 출현한 상황을 가정하면 그 변화량은 Fig.5.29 과 같다. 이를 거리에 따라 평균하여 수심에 따라 나타내면 Fig. 5.30 과 같다. Fig.5.30 의 결과를 보면 일변화와 저염분수로 인한 변화가 모두 표층에서 변화를 보이는데, 일변화로 인한 변화보다 저염분수로 인한 변화가 더 큰 것으로 나타나며 저염분수로 인한 전달손실 변화는 표층 5m 이내의 수심에서 평균적으로 7~8dB 정도의 변화를 보일 수 있다는 것을 의미한다.

반면 음원이 20m 지점에 위치한 경우는 다음과 같다. 오후 10 시의 해양환경을 기준으로 오전 11 시의 환경으로 일변화한 후의 변화량은 Fig.5.31 과 같으며 저염분수로 인한 변화량은 Fig.5.32 와 같다. 이를 거리에 따라 평균하여 수심에 따른 평균 변화량으로 나타낸 경우를 Fig.5.33 에 나타내었다. 일변화로 인한 전달손실은 10m 이하의 수심에서 다소 변화가 있었으며 그로 인해 양의 값을 나타내고 있다. 그러나 저염분수 환경의 경우 제 3 장에서의 결과와 같이 저염분수로 인한 전달손실변화는 거의 없는 것으로 나타난다.

위의 두 결과를 종합하면, 음원이 표층부근에 있는 경우는 저염분수 발생으로 인한 변화량이 더 크나, 음원이 수온약층부근에 있는 경우는 수온의 일변화로 인한 변화량이 더 크다는 결론을 내릴 수 있다.

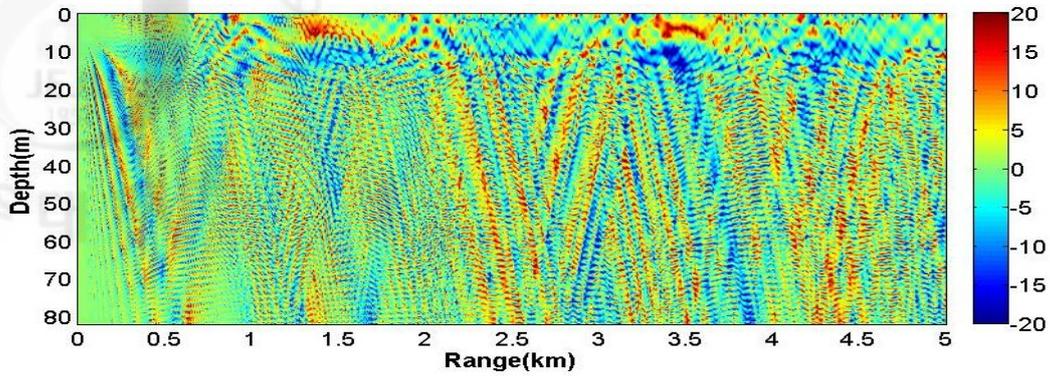


Fig. 5.28. TL difference for diurnal variation of ocean in normal salinity environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.24(a) and Fig.5.24(b) where source depth is 5m .

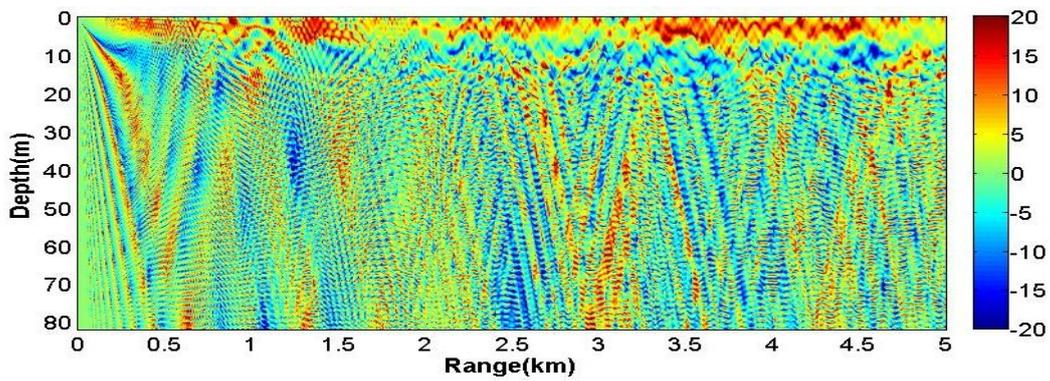


Fig. 5.29 TL difference for salinity variation of ocean environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.24(a) and Fig.5.24(c) where source depth is 5m .

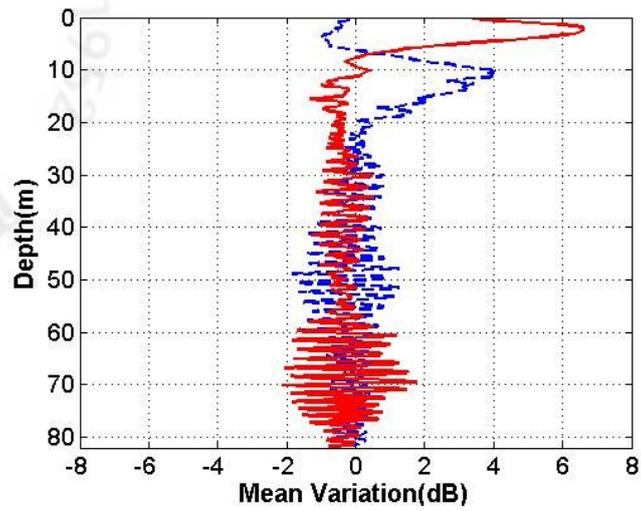


Fig. 5.30. Mean variation of TL with depth by taking the average of TL difference over ranges from 0 to 5 km; diurnal variation (dashed line) and salinity variation (solid line) where source depth is 5m.

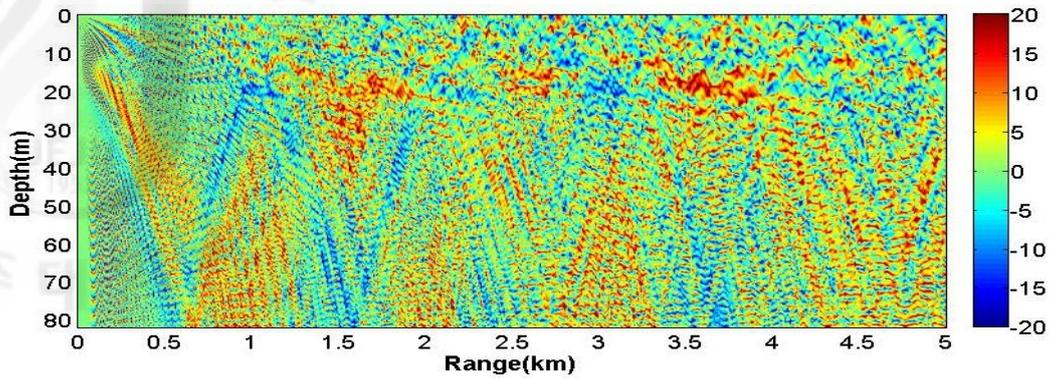


Fig. 5.31. TL difference for diurnal variation of ocean in normal salinity environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.25(a) and Fig.5.25(b) where source depth is 20m .

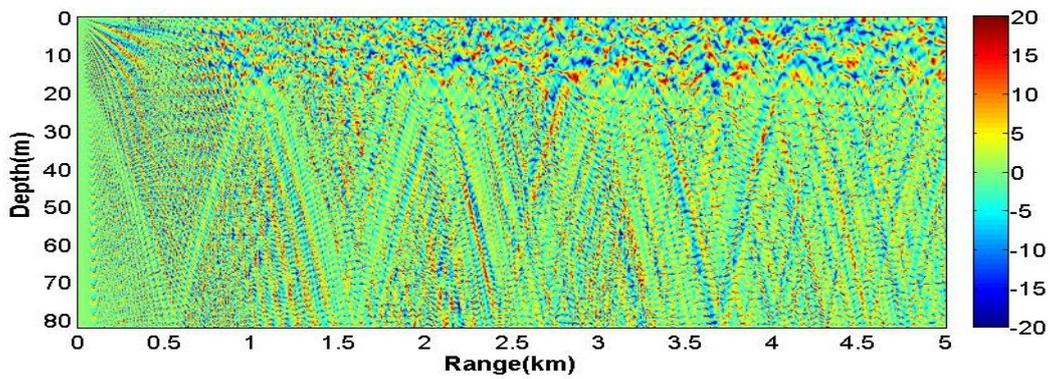


Fig. 5.32. TL difference for salinity variation of ocean environment at Site A result from subtraction of TL between Fig.5.25(a) and Fig.5.25(c) where source depth is 20m .

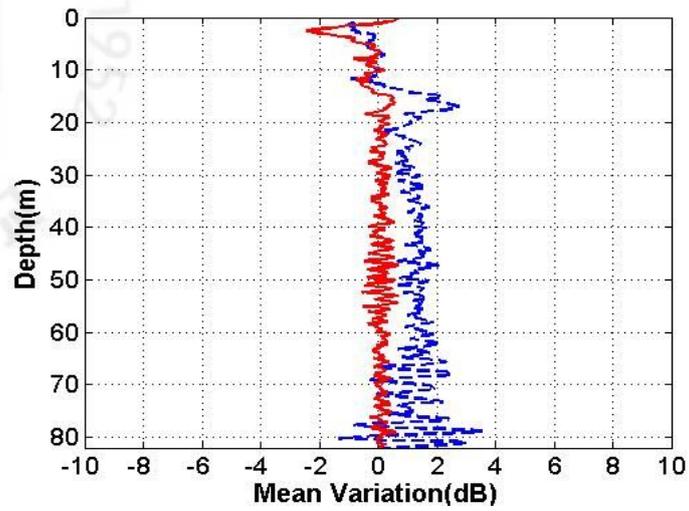


Fig. 5.33. Mean variation of TL with depth result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation (dashed line) and salinity variation (solid line) where source depth is 20m.

3.2.2.1 저염분수환경에서 음파전달의 일변화

본 절에서는 저염분수가 존재하지 않는 환경에서 음파전달의 일변화와 저염분수가 존재하는 환경에서 수온변화에 따른 일변화를 비교함으로써 저염분수가 존재하는 환경에서의 일변화 특징을 살펴본다.

먼저 정점 A 에서 음원이 수심 5m 에 위치하고 오후 10 시의 해양환경을 기준으로 오전 11 시로 일변화할 때 저염분수가 존재하지 않는 경우의 일변화와 저염분수가 존재하는 경우의 일변화를 Fig.5.34 에 점선과 실선으로 나타내었고 음원이 수심 20m 에 위치하는 경우를 Fig.5.35 에 나타내었다. 마찬가지로 정점 B 에서 음원이 수심 5m 에 위치하고 오후 8 시의 해양환경을 기준으로 오전 3 시로 일변화할 때 저염분수가 존재하지 않는 경우의 일변화와 저염분수가 존재하는 경우의 일변화를 Fig.5.56 에, 수심이 20m 인 경우를 Fig.5.27 에 나타내었다.

먼저 Fig.5.34 는 정점 A 에서 음원의 수심이 5m 인 경우의 결과를 나타내고 있다. 저염분수가 존재하는 환경에서 음파전달의 일변화량은 저염분수가 존재하지 않는 환경과 음파전달 일변화량과 큰 차이를 보이지 않는다. 두 경우 모두 수심 20m 이하에서의 변화량은 거의 없으며 표층에서 수심 20m 사이에 변화량이 양의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 저염분수가 존재하는 환경이나 그렇지 않은 환경의 일변화 모두 수온약층에서의 음속이 최대가 될 경우가 최저일 경우에 비해 표층에서의 전달 손실이 더 적다는 것을 의미한다. 그런데 이러한 일변화의 차이는 저염분수가 존재하는 환경일 때가 저염분수가 존재하지 않는 환경일 때 보다 약 2dB 정도 더 크게 나타났다.

위와 동일한 환경에서 음원이 수심 20m 에 있는 경우의 결과를 Fig.5.35 에 나타내었다. 이 결과는 저염분수 환경과 일반적인 환경에서의 일변화 모두 수온약층 부근에서 전달 손실 변화가 크다는 것을 나타내며 전반적인 수심에 걸쳐 거리에 따라 평균적으로 약 1~2dB 정도 차이를 보인다는 것을 나타낸다. 저염분수가 존재하는 환경의 경우와 존재하지 않는 환경의 경우가 거의 동일한 값을 갖는 것으로 보아 음원이 수온약층에 위치하는 경우(수심 20m)는 전달손실의 일변화량에 기여하는 저염분수의 영향은 거의 없다는 것을 나타낸다.

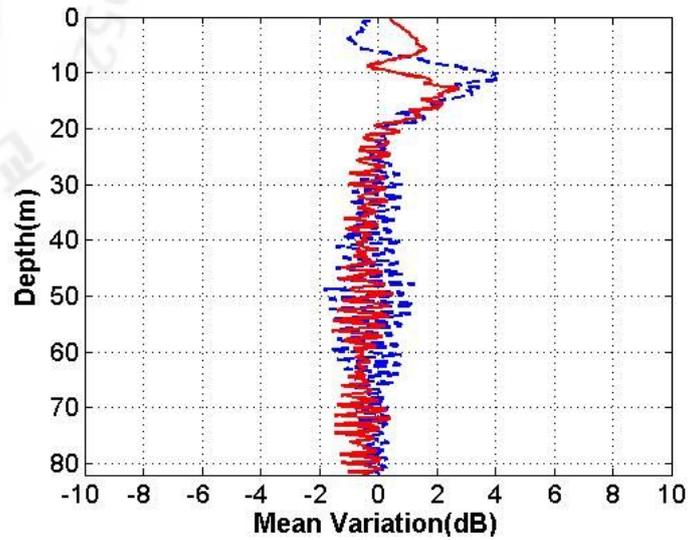


Fig. 5.34. Mean variation of TL with depth in Site A result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 5m.

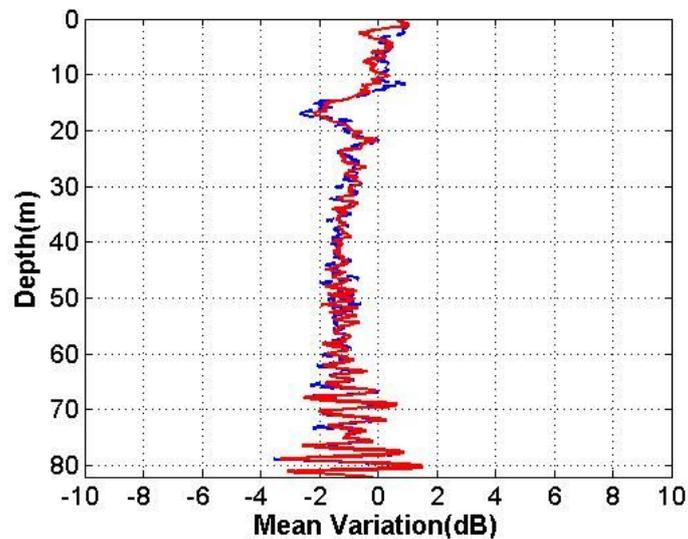


Fig. 5.35. Mean variation of TL with depth in Site A result from taking the average of TL difference with range; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 20m.

다음은 정점 B 에서의 결과를 나타내며 방법은 동일하다. Fig.5.67 은 음원의 수심이 5m 인 경우를 나타내며 저염분수 환경에서의 일변화와 일반적인 환경에서의 일변화의 변화량이 서로 다른 모습을 보여주고 있다. 저염분수가 존재하지 않는 경우의 전달손실 변화를 보면 수온약층에서의 음속이 최대로 증가함에 따라 혼합층이 두터워 지면서 약한 표층채널을 형성하였으며 그로 인해 전달 손실이 감소하였고(Fig.5.26(b)로부터 (a)로의 변화), 그 결과 수온약층에서 음속이 최저인 경우와의 전달손실 차이를 통해 표층부근에서 약 4dB 의 값을 갖는다(Fig.5.37). 저염분수가 존재하는 환경의 경우는 다음과 같다. 수온약층 음속이 최대일 때 저염분수가 표층채널을 더욱 강화시켰고 따라서 전달손실이 큰 폭으로 감소하였다. 그러나 수온약층의 음속이 최저일 때는 혼합층이 거의 존재하지 않아(표층채널 생성이 어려움) 저염분수로 인한 음속변화가 거의 없으며, 그로 인해 표층 전달손실이 크게 나타났다. 결과적으로 음원이 표층에 있고 저염분수가 존재하는 환경에서는 전달손실의 변동폭이 매우 커지므로 Fig.5.37 과 같은 결과를 보이고 있다.

음원의 수심이 20m 인 경우는 Fig.5.37 과 같으며 이는 평균적 전달손실 변화량이 저염분수 환경인 경우와 일반적 염분분포일 때의 경우가 크게 다르지 않으므로 저염분수로 인한 전달 손실 변화가 거의 없다는 점을 알 수 있다.

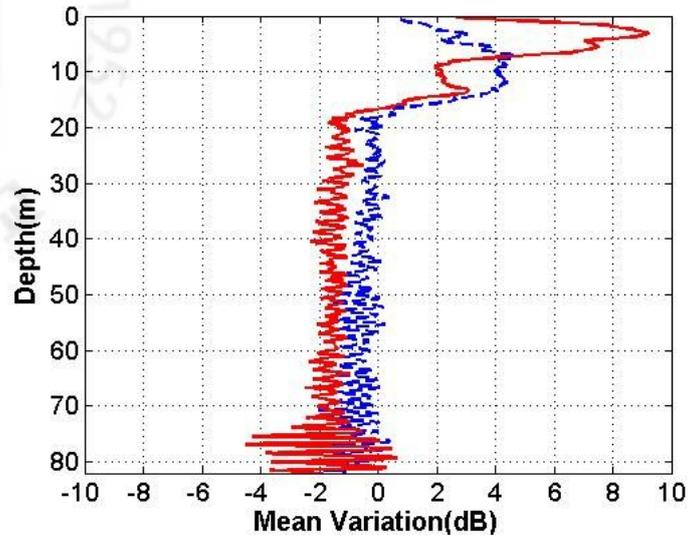


Fig. 5.36. Mean variation of TL with depth in Site B result from taking the average of TL difference with range for each depth; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 5m.

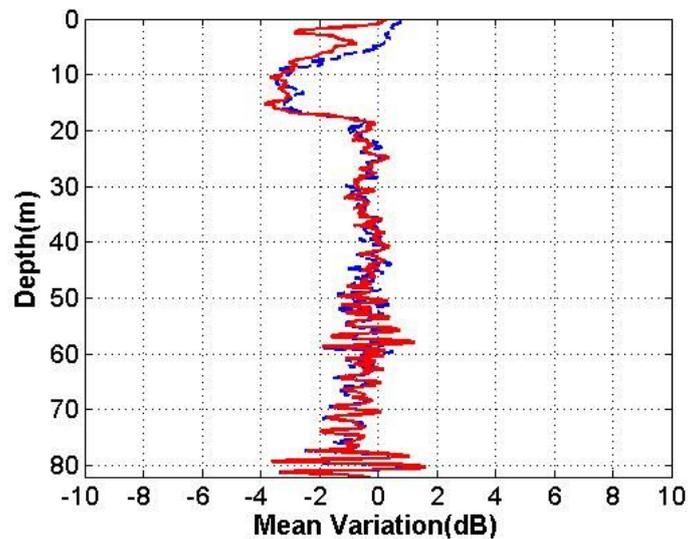


Fig. 5.37. Mean variation of TL with depth in Site B result from taking the average of TL difference with range for each depth; diurnal variation with normal salinity condition (dashed line) and diurnal variation with low salinity condition (solid line) where source depth is 20m.

결론

및 향후 연구

본 논문은 중국대륙연안수로부터 발생된 저염분수가 음파전달 변화에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 저염분수는 매우 거대한 강이나 강우량이 많은 해역에 한정적으로 발생하는 특별한 현상이다. 현재까지 물리해양학 분야에서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 오고 있는 반면 수중음향학 에서의 연구는 미진한 실정이다. 특별히 여름철 제주서부해역에서는 중국 양쯔강으로부터 배출되는 담수의 영향으로 표층에서의 염분변화가 크게 관측된다. 따라서 본 논문에서는 여름철 제주 서부해역에서 발생하는 저염분수 환경에서의 음파전달 특성을 밝히고자 다각적인 접근을 시도하였다.

먼저 저염분수의 일반적인 특성을 살펴보기 위해 평균 음속분포를 구하였다. 이때 표층음속은 약 5.6m/s 감소하였으며 그로 인해 음속수직분포가 양의 기울기를 갖게 되어 표층에서 음파 채널이 형성 되었다. 이 현상은 저염분수가 매우 강했던 1996 년 8 월의 경우도 같았으나 매우 낮은 저염분 성분으로 인해 저염분수의 평균 음속수직분포보다 더 큰 양의 기울기를 갖는 표층음파채널이 형성 되었다. 제주 서부해역의 정점에서 30 년간의 자료분석결과 염분과 표층채널형성은 단순한 상관관계를 갖지 않았다. 반면 표층채널이 수온수직분포의 기울기와 염분수직분포의 기울기 사이의 관계에 의해 결정된다는 것을 수온-염분 기울기 도표를 이용하여 확인하였다. 이러한 결과는 차후 저염분수환경에서 음파채널 형성 유무를 염분의 영향과 관련 지어 해석할 때 매우 유용하게 사용 될 수 있을 것으로 생각된다.

저염분수로 인해 표층채널이 형성 될 경우 음파전달은 다양한 측면에서 변화를 겪게 된다. 먼저 표층채널을 통해서 음파 에너지가 간혀 전달손실의 영향을 적게 받으며 전달되는데, 이는 음파의 파장에 따라 다른 결과를 나타낸다. 저염분수의 평균 음속수직분포를 가정할 경우 채널 수심은 약 5m 이고 차단 저주파수는 8.23kHz 로 나타났으며 저염분수가 강하게 발생하였던 1996 년

8 월의 경우에는 채널의 수심이 약 7m, 차단 저주파수는 2.54kHz 로 나타났다. HMS(Hull Mounted Sonar)의 운용수심이 10m 이내이고 주파수가 보통 8~10kHz 인 것을 감안하면 평균적인 저염분수 환경에서 HMS 는 표층채널의 영향을 받게 될 것으로 예상된다. 그러나 만약 평균보다 더 낮은 이상저염분수가 출현한다고 하면 그 영향은 더욱 가중될 것이다. 그러므로 여름철 제주 서부해역에서 HMS 를 운용할 시에는 이러한 현상을 충분히 고려해야 할 것이라 판단된다.

저염분수는 거리에 따라 그 분포가 다양한 형태를 갖는다. 저염분수피가 발생한 해상에서 음원이 표층부근에 위치한 경우의 음파전달을 가정하면, 수피의 중심에서 멀어질수록 염분이 증가하여 표층채널이 소멸되는 현상을 예상할 수 있다. 이 때에는 음파가 표층을 따라 전달되다가 표층채널이 소멸되는 지점에서는 모든 음파가 해저면을 향하여 하향굴절 되어 음파에너지는 곧 소멸되게 된다. 그러나 저염분수피 안에서도 수온수직분포의 영향으로 표층음파 채널이 형성되지 않을 수도 있다는 점을 고려해야 된다.

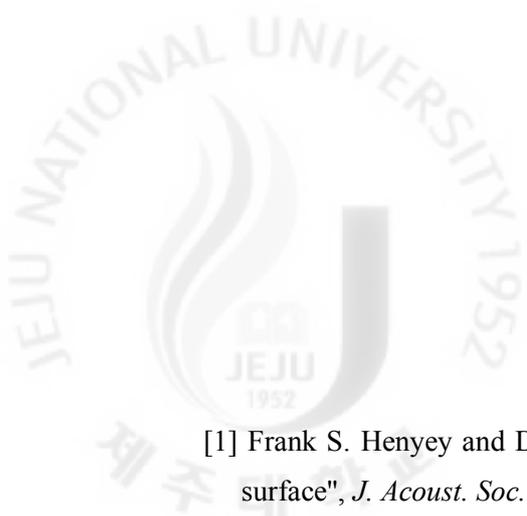
수온의 일변화와 저염분수로 인한 음파전달을 비교해 보았다. 수온의 일변화는 저염분수 환경에서도 여전히 음속변화에 큰 영향을 미치는 요소임이 드러났다. 그러나 수온이 수온약층 부근에서만 큰 폭으로 변하고 혼합층에서의 변화는 거의 없는 해양환경에서는 음원이 표층부근에 위치할 경우의 음파전달 변화는 수온의 일변화보다 저염분수로 인해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

지금까지 저염분수 환경에서의 음파전달 변화를 다양한 관점에서 분석해 보았다. 그러나 향후에는 보다 많은 실측 해양자료를 통한 결과의 비교가 필요하다. 특히 저염분 수피에서 염분이 공간적인 변화를 보이는 경우에 대한 자료와 실제 저염분수 환경에서 수온의 일변화하는 경우에 대한 자료 등을 이용해야 보다 실질적인 해석을 할 수 있다. 한편, 이러한 실제적이고 구체적인 분석이 되고 나면 실 해역 실험이 진행 되어야 하겠다. 모의실험을 통해 밝혀진 음파전달 특성이 실제 환경에서도 드러나는지 검증이 필요하다.

만일 수중음향을 이용해 저염분수를 검출하는 연구가 진행된다면 매우 유용할 것이다. 현재까지 두 가지 방법을 고려할 수 있는데, 첫 번째는 저염분수의 특징인 표층채널을 이용하여 저염분수를 검출하는 방법이며, 두 번째는 해양음향토포그래피(Ocean Acoustic Tomography)를 이용한 방법이다. 전자의 경우

표층채널이 형성되지 않을 경우 저염분수가 존재하는 환경이라 해도 염분을 측정할 수 없는 경우가 발생할 수 있다는 점을 고려해야 하며, 후자의 경우 송수신단의 거리와 신호 도달시간을 이용하여 역문제(inverse problem)의 해를 구함으로써 음속을 추정해 내는데 음속을 변화시키는 요인으로써 두 가지 미지의 인자 즉, 수온뿐만 아니라 염분을 고려를 해야 한다는 점을 고려해야 한다.

저염분수 환경에서의 음파전달은 앞으로 더욱 연구되어야 할 부분이 많이 있다. 그러나 아직까지 연구된 바가 많지 않으므로 본 논문의 내용들은 차후 연구들을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.



참고문헌

- [1] Frank S. Henyey and Daniel Wirmser, "Acoustic scattering from a non-Gaussian ocean surface", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87, No. 6, pp. 2477-2480, 1990
- [2] David R. Dowling and Darrel R. Jackson, "Coherence of acoustic scattering from a dynamic rough surface", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 6, pp. 3149-3157, 1993
- [3] Jeffrey A Nystuen and Barry Ma, "Using Ambient Sound to Passively Monitor Sea Surface Processes", *Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC 2002)*, Special Vol, p 9-14, 2002
- [4] Mark A McDonald et.al, "Increase in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 120, No. 2, pp. 711-718, 2006
- [5] A. Prosperetti, N. Q. Lu and H. S. Kim, "Active and passive acoustic behavior of bubble clouds at the ocean's surface", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 93, No. 6, pp. 3117-3127, 1993
- [6] Mark V. Trevorrow, "Measurements of near-surface bubble plumes in the open ocean with implications for high-frequency sonar performance", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 5, pp. 2672-2684, 2003
- [7] F. B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter and H. Schmidt, "Computational Ocean Acoustics", *AIP Press*, pp.40-54, 1993
- [8] B.G.Katsnelson and V.G.Petnikov, "Shallow Water Acoustics", *Springer*, pp.47-79, 2001
- [9] J. F. Lynch, Y.T. Lin, T. F. Duda and A. E. Newhall, "Acoustic Ducting, Reflection, Refraction and Dispersion by Curved Nonlinear Internal Waves in Shallow Water", *IEEE J. Ocean. Eng.*, Vol. 35, no. 1, pp. 12-26, 2010
- [10] H. Medwin, "Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters", *J.*

Acoust.soc. Am., Vol. 58, No. 6, pp.1318-1319 , 1975

- [11] 노홍길, 정공훈 “제주도 연안의 환경특성에 관한 기초적 연구”, *제주대학교 해양자원 연구보고*, 4, 1~5, 1980
- [12] 강철중, “한국 남해안 연안수의 계절적 변동에 관한 연구”, *국립수산진흥원 연구보고*, 12, 107~121, 1974
- [13] I. O. Kim, H. K. Rho, “A study on China Coastal Water Appeared in the Neighboring Seas of Cheju Island ”, (in Korean), *Bull. Korean Fish. Soc.* 27(5), 515-528, 1994
- [14] Beardsley, R.C., R. Limeburner, D. Hu, K. Le, G.A. Cannon and D. J. Pasinski, "Structure of the Changjiang River Plume in the East China Sea during June 1980", *Int. Symp. on Sedimentation on the Continental Shelf with Special Reference to the East China Sea*, 243-260, 1983.
- [15] H. Yu, D. Zheng and J. Jiang, “Basic hydrographic characteristics of the studied area”, *Int. Symp. on Sedimentation on the Cotiental Shelf, wih Special Reference to the East China sea*, Hangzhou, April, 270-279, 1983
- [16] K.H.Oh,Y.G.Park,D.I.Lim,H.S.Jung and J.S.Shin, “Characteristics of Temperature and Salinity observed at the Ieodo Ocean Research Station”, (in Korean), *J. Mar. Env. Eng., Soc, Kor*, 2006
- [17] Lie H-J “structure and eastward extenstion of the Changjiang River plume in the East china Sea”, *J.Geophys.Res.*, vol.108, No.C3, pp. 3077, 2003
- [18] K.H.Hyun and I.C.Pang, “Abnormally low salinity waters around Cheju Island in summer”,(in Korean), *Bull. Mar. Res. Inst. Cheju Nat. Univ.*, Vol.2, pp.69~78, 1998
- [19] H.J.Yoon and H.K.Cho, "A study on the influence of the China Coastal Waters nearby Jeju Island by Topex/Poseidon and NOAA Satellite Data ", *proceedings of Mar. Env. Eng., Soc, Kor*,Vol.2005 No.5
- [20] H.J.Yoon, H.K.Cho, and Y.H.Ahn, "Influence analysis of china Coastal water in the seas

surrounding Jeju Island using satellite data and empirical orthogonal function analysis",
(in Korean), *Korean J. Remote Sensing*, Vol.21, No.6, pp.469-482, 2005

- [21] 정희동, 황재동, 정규귀, 허 승, 성기탁, 고우진, 김상우 "하계 동중국해 저염분수 이동과 바람의 영향", *한국해양학회 2003년도 추계 학술발표대회 요약집*, 2003
- [22] P. C. Chu C. R. Fralick Jr., S. D. Haeger and M. J. Carron "A parametric model for the Yellow Sea thermal variability", *J. Geophys Res.*, Vol. 102, No. C5, pp. 10,499-10,507, 1997
- [23] S. E. Dosso and N. R. Chapman, "Acoustic propagation in a shallow sound channel in the Northeast Pacific Ocean", *J. Acoust. Soc. Am.* 75 (2), pp.413-418 February 1984
- [24] N. P. Bulgakov, Yu. V. Artamonov, P. D. Lomakin and V. N. Cheremin, "Acoustic properties of surface water masses in the tropical Atlantic and their seasonal variability", *Sov. J. Phys. Oceanogr.*, Vol.3, No.2, pp. 141-147, 1992
- [25] KODC online service, http://kodc.nfrdi.re.kr/page?id=kr_index
- [26] M.B. Porter and H.P. Bucker, "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 82, No. 4 pp. 1349-1359, 1987.
- [27] M.D. Collins and E.K. Westwood, "A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth, sound speed and density", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89, pp.1068-1075, 1991
- [28] R.J. Urick, "Principles of underwater sound" 3rd Edition, *McGraw-Hill*, pp.147-153, 1983
- [29] X. Lurton, "An Introduction to Underwater Acoustics", *Springer*, pp.29-34, 2002
- [30] L.M. Brekhovskikh and Yu.P. Lysanov, "Fundamentals of ocean Acoustics", 3rd Edition, *Springer*, pp.1-6, 2002

감사의 글

대학원 입학을 고민하던 때가 엇그제 같은데 어느덧 석사과정을 마무리 하고 있습니다. 걸어온 발자취를 돌아보는 지금, 지나온 2 년이 마치 어젯밤 꿈처럼 느껴집니다. 참 힘든 일도 많았지만 그런 순간마다 다시 일어설 수 있었던 것은, 그래서 이 길을 걸어올 수 있었던 것은 모두 하나님의 은혜였음을 고백하지 않을 수 없습니다.

먼저 서툰고 실수도 많은 저에게 늘 기회와 격려로, 인내와 사랑으로 이끌어주신 팽동국 지도교수님께 감사 드립니다. 스승으로써, 인생의 선배로써 저에게 주신 조언들은 제가 서있는 초석입니다. 늘 가까이서 많은 가르침과 학문적인 조언을 아끼지 않으시는 이종현 교수님, 배진호 교수님께 감사 드립니다. 그리고 조일형교수님께 감사를 드립니다. 지난날 주신 관심과 격려를 잊지 않고 있습니다. 열정으로 가르쳐 주시는 유원선 교수님 감사 드립니다. 연구를 위해 자료를 공유해 주시고 논문의 심사를 맡아주신 방익찬 교수님 그리고 연구에 관심을 가져주신 R. Chapman 교수님께 감사 드립니다.

지난 2 년간 연구와 대학원 생활에 큰 도움을 주신 제 유일한 사수 태훈이형께 감사의 뜻을 전합니다. 많은 경험적 지식과 자료를 나누어 주신 혁준이형, 재일이형, 서로 의지하고 힘이 되어준 정록이, 성협이에게 감사합니다. 그리고 Chandran, 콩치, 리우시아오 에게도 고맙다고 전하고 싶습니다. 지금은 멀리 있지만 학부 때부터 지금까지 많은 도움을 주신 Ying, 승우형, 정희형, 정훈이형, Mano, 그리고 명승이형, 유진이형, 선우형 에게 감사합니다. 옆에서 늘 함께 해준 헤빈이, 병진이, 한수, 종우, 효건이, 은영누나, 대희를 비롯한 해양시스템공학과 모든 식구들 그리고 인용이, 형민이, 주형이형에게 감사합니다. 의공학협동과정의 양정화선생님, 윤정이, 현재 그리고 때마다 큰 도움을 주신 관석이형과 해양의생명공학과 현기형에게도 감사의 뜻 전합니다. 서로 의지하며 최선을 다해 살아가는 친구들, 형석이, 호건이, 인규, 지은이, 택균이, 성진이, 영종이, 영관이, 준혁이, 우원이, 수연이에게 감사합니다. 다 잘 되자.

삶의 소망을 함께하는, 서성환 목사님을 비롯한 사랑하는 교회 모든 성도님들께 감사 드리고 내게 늘 힘이 되어주는 소현이에게 특별한 감사를 전합니다. 끝으로 사랑하는 아버지, 어머니, 경은이에게 더 할 수 없는 감사의 마음을 전하며 이 논문을 마칩니다.